

Technická univerzita v Liberci  
**Fakulta strojní**  
Katedra strojírenské technologie

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 3911R018 Materiály a technologie

Zaměření: Strojírenská metalurgie

## **Vliv parametrů navařování MAG kuličkové litiny na strukturu návaru a TOO**

### **Effect of GMA Welding Parameters on the Structure of the Weld Deposit on Spheroidal Cast Iron and HAZ**

**KSP – SM – B20**

**Nikolaj Vladislavov Mutafov**

Vedoucí práce: Prof.ing. Iva Nová, CSc.

Konzultant: Ing. Zdeněk Hudec, Ph.D.

Počet stran: 47

Počet příloh: 2

Počet obrázků: 41

Počet tabulek: 6

05.06.2009

## **Vliv parametrů navařování MAG kuličkové litiny na strukturu návaru a TOO**

### **ANOTACE:**

Bakalářská práce řeší optimalizace podmínek navařování návarů trubičkovým drátem řady EnDOtec typu DO\*325 na litinu s kuličkovým grafitem za použití různých kombinací parametrů svařování. Sleduje a posuzuje se geometrie a kvalita návaru. U geometrií návaru se sledují a posuzují následující faktory: tvar, plocha, šířka, zředění, převýšení, závar, poměr šířky svarové housenky k převýšení a závaru, šířka TOO (tepelně ovlivněná oblast). Z hlediska kvality návaru se sledují a posuzují následující faktory: přítomnost trhlin a jejich možný původ, tvrdost návaru, u vytypovaných návarů mikrotvrdost přechodu materiál – návar a mikrostruktura návaru a tepelně ovlivněné oblasti. Dále jsou zkoumány metalografické struktury vznikající v návaru a v tepelně ovlivněné zóně a je posuzován jejich vliv na kvalitu vzniklého návaru.

## **Effect of GMA Welding Parameters on the Structure of the Weld Deposit of Spheroidal Cast Iron and HAZ**

### **ABSTRACT:**

Bachelor's thesis addresses the optimization of GMA welding conditions of weld surfacing by cored wire series EnDOtec type DO\*325 on the cast iron with spheroidal graphite, using various combinations of welding parameters. In this thesis is carried out by the monitoring and assessing the geometry and quality of the weld deposit. Factors of weld deposit geometry that are concerned: shape, size, width, dilution, reinforcement, penetration, the ratio of the width to the reinforcement and to the depth of the weld, width HAZ (heat affected zone). In terms of weld quality following factors are monitored and assessed: the presence of cracks and their possible origin, hardness of the weld deposit, selected welds microhardness at material–weld deposit transition and microstructure of weld deposit and HAZ (heat affected zone). In addition metallographic structures arises in weld deposit and heat affected zone are observed and it is evaluated how these structures affect the quality of weld deposit.

### **Místopřísežné prohlášení**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně  
s použitím uvedené literatury a pod vedením vedoucího a konzultanta

V Liberci dne 05.06.2009

.....

## Obsah

1. ÚVOD .....	6
2. TEORETICKÁ ČÁST .....	7
2.1 Princip svařování MAG .....	7
2.1.1 Přenos kovu do svarové lázně .....	7
2.2 Fyzikální podstata obloukového svařování MAG .....	7
2.2.1 Síly, působící při přenosu kovu z odtavující se elektrody .....	8
2.3 Krystalizace svarového kovu spoje .....	10
2.3.1 Vliv svařovací rychlosti na tvar svarové lázně a orientaci a tvar dendritů .....	10
2.4 Měrné vnesené teplo .....	12
2.5 Automatizace .....	12
2.6 Trubičkový drát .....	12
2.7 Vznik svarového spoje .....	13
2.7.1 Vznik svarového spoje při použití trubičkových elektrod .....	13
2.7.2 Zředění svarového kovu nataveným základním materiálem .....	13
2.8 Navařování litiny .....	14
2.8.1 Charakteristika litiny .....	14
2.8.2 Grafické litiny .....	14
2.8.3 Predikce struktury svarového kovu .....	15
2.8.3.1 Grafické řešení - příklad .....	16
2.8.4 Proces navařování .....	17
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	19
3.1 Cíl práce .....	19
3.2 Rozbor podmínek navařování litiny .....	19
3.2.1 Podmínky návrhu experimentu .....	19
3.3 Plán experimentu .....	20

<b>3.4 Výsledky navařování litiny s kuličkovým grafitem .....</b>	<b>21</b>
<b>3.4.1 Zhodnocení výsledků, diskuze .....</b>	<b>23</b>
<b>3.4.1.1 Posouzení geometrie návaru .....</b>	<b>23</b>
<b>3.4.1.2 Grafy a komentář ke geometrii návaru .....</b>	<b>23</b>
<b>3.4.1.3 Grafy a komentáře ke kvalitě návaru .....</b>	<b>27</b>
<b>3.5 Měření tvrdosti návarů .....</b>	<b>27</b>
<b>3.5.1 Měření mikrotvrdosti a metalografické struktury v tepelně ovlivněné oblasti .....</b>	<b>29</b>
<b>3.5.2 Tepelně ovlivněná oblast .....</b>	<b>33</b>
<b>3.6 Vznik trhlin .....</b>	<b>40</b>
<b>4. ZÁVĚR .....</b>	<b>42</b>
<b>5. Seznam použité literatury .....</b>	<b>45</b>
<b>6. Seznam příloh .....</b>	<b>47</b>
<b>7. Seznam použitých zkratk .....</b>	<b>47</b>

## 1. Úvod

V současné době má značný význam renovace strojních součástí. Mezi tyto metody se řadí navařování. Navařování, podobně jako svařování, vychází ze stejného metalurgického principu. Svařování je metalurgický proces, při kterém se vytvářejí nerozebíratelná spojení prostřednictvím meziatomových vazeb mezi svařovanými částmi přímo nebo prostřednictvím přídavného materiálu při ohřevu nebo plastické deformaci [1].

Navařování je nanesení vrstvy kovu na povrch základního materiálu pomocí svařování. Vrstva naneseného kovu se nazývá návar, část povrchu základního materiálu určená pro navařování se označuje jako návarová plocha. Při navařování návar tvoří funkční plochu součásti. Návar může nebo nemusí mít odlišné chemické složení. Mezi nejrozšířenější způsoby navařování patří metody navařování elektrickým obloukem - ručně obalenou elektrodou, v ochranných atmosférách, pod tavidlem, trubičkovou elektrodou, a navařování plamenem. Svařování může být ruční, poloautomatické a automatizované [1], [2].

Převažující metodou navařování bylo v minulosti navařování drátem nebo páskou pod tavidlem. Tato práce je zaměřena na navařování litiny funkčním návarem určené tvrdosti metodou MAG novou sérií trubičkových drátů řady EnDOtec firmy Castolin. Cílem je vyzkoušet a doporučit rozsah svařovacích podmínek a parametrů pro efektivní a kvalitní zhotovení návaru.

V současné době je trend navařovat i materiály, které se dříve řadily do materiálů obtížně svařitelných. K těmto materiálům se řadí také grafitické litiny. Jednou z perspektivních grafitických litin je litina s kuličkovým grafitem. Touto záležitostí se zabývají některé svařovací firmy, které připravují podklady pro možnou technologii uplatnění procesu navařování a také k tomu zabezpečují potřebná zařízení, pomůcky, i navařovací materiály. Problematikou navařování litiny s kuličkovým grafitem se v poslední době zabývají i pracovníci Katedry strojírenské technologie, FS na TU v Liberci. V tomto smyslu je řešena i tato bakalářská práce, která je na téma: „Vliv parametrů navařování MAG kuličkové litiny na strukturu návaru a tepelně ovlivněnou oblast“.

## 2. Teoretická část práce

### 2.1 Princip svařování MAG [1]

Teplo potřebné k vytvoření svarové lázně natavením je vyvíjeno obloukem, který hoří mezi základním materiálem a elektrodou. Elektrická energie přeměněná na teplo vytváří oblouk o teplotě přes 6000°C, čímž se kovy roztaví a spojí. Ochranná atmosféra chrání roztavený kov ve svarové lázni před nepříznivými účinky okolní atmosféry (hlavně kyslíku a dusíku a také vodíku). Svařování v ochranných atmosférách nachází uplatnění ve všech oborech svařovaných konstrukcí. To je způsobeno vysokou produktivitou, zlepšením hygieny prostředí, možností svařovat ve všech polohách, umožněním automatizace a robotizace svařování. Ochranná atmosféra může být tvořená aktivním ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ) nebo inertním plynem (např. Argon, Helium), nebo se používají atmosféry ze směsných plynů ( $\text{Ar} + \text{O}_2$ ,  $\text{Ar} + \text{CO}$ ,  $\text{Ar} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$ ,  $\text{Ar} + \text{He} + \text{CO}_2 + \text{O}_2$ ). Přídavek kyslíku do svarové lázně snižuje její viskozitu a tím že snižuje převýšení svarové housenky, zlepšuje přechod svaru do základního materiálu.

#### 2.1.1 Přenos kovu do svarové lázně [1]

Existují 2 způsoby přenosu svarového kovu do lázně – zkratový a bezzkratový. Pro svařování se používají zdroje stejnosměrného svařovacího proudu s plochou statickou charakteristikou a obrácenou polaritou, kdy je elektroda připojena kladný pól.

Zkratový přenos je typický pro svařování v atmosféře oxidu uhličitého. Pro zkratový přenos je typické, že konec narůstající kapky se dotkne svarové lázně dříve, jak se kapka oddělí od elektrody a nastane zkrat. Po jejím odtrhnutí se proces opakuje.

Bezzkratový způsob svařování je možný pouze pro svařování ve směsných plynech, například směs  $\text{Ar} + \text{CO}_2$ . V tomto případě jsou kapky svarového kovu velmi malé, kov se přenáší buďto sprchou nebo řízeným pulzem.

Přenos zkratem používáme především v případech, kdy požadujeme malé množství vneseného tepla do svarového kovu – například pro svařování slabých plechů (oprava karoserií automobilů v důsledku vzniku malých deformací a lepší odolnosti proti korozi).

Specifickým případem svařování MAG je svařování v ochranné atmosféře  $\text{CO}_2$ . Princip svařování v ochranné atmosféře je založen na tom, že holý svarový drát svinutý na cívce, je veden přes podávací kladky do průvlastku, přes který přechází do drátu proud. Ochranná atmosféra chrání oblouk a tavnou lázeň před přístupem vzduchu. Oblouk hoří mezi elektrodou a základním materiálem. Při svařování v  $\text{CO}_2$  lze svařovat zkratovým a bezzkratovým způsobem.

### 2.2 Fyzikální podstata obloukového svařování MAG [1]

Elektrický oblouk hoří mezi kovovým přídavným drátem (nepřetržitě dodávaným do svaru) a základním svařovaným materiálem. Oblouk a svarová lázeň jsou chráněny proudem inertního nebo aktivního plynu. Používají se vysoké proudové hustoty ( $100\text{--}400\text{A}\cdot\text{mm}^{-2}$ ), proto se dosahuje vysokých svařovacích rychlostí a výkonů navaření.

Při tavném svařování se tvoří svarová lázeň, jejíž velikost i tvar závisí na parametrech procesu svařování (například na tepelném příkonu, rychlosti svařování, tepelně fyzikálních vlastnostech svařovaného materiálu, tloušťce základního materiálu apod.). Na čelní straně svarové lázně probíhá krystalizace svarového kovu spoje. Ve svarové lázni vznikají konvekční proudy, které umožňují přenos tepla a hmoty uvnitř svarové lázně.

Při svařování elektrickým obloukem s odtavující se elektrodou přechází tekutý kov do svarové lázně převážně ve formě kapek různých rozměrů. Způsob oddělování a přenos kapek z odtavující se elektrody do svarové lázně závisí na silovém působení při tvorbě, oddělování a

urychlování kapek. Způsob přenosu kovu do svarové lázně může výrazně ovlivnit operační vlastnosti svařovacího procesu nebo vyvolat specifické požadavky na konstrukci zdrojů proudu pro svařování. Ovlivňuje také stabilitu svarové lázně, ztráty rozstříkem, závar a podobně.

### 2.2.1 Síly, působící při přenosu kovu z odtavující se elektrody [1]

Při svařování odtavující se elektrodou působí na kapku tekutého kovu gravitační síla, elektromagnetická síla, reaktivní síla vyvolaná vypařováním kovu z povrchu kapky a vývinem plynů, tlak plazmových toků, síla při výbuchu (rázová vlna) tenkého krčku mezi elektrodou a kapkou při zkratovém přenosu, síla z dynamického rázu při vzniku výboje po zkratu.

Gravitační síla hraje významnější roli pouze u rozměrnějších kapek. Při svařování v poloze nad hlavou působí proti přenosu kovu. Pokud se nesvařuje v poloze vodorovné shora, působí tato síla odklon kapky od osy elektrody. Pro kulový tvar kapky je možno tuto sílu vyjádřit vztahem (1):

$$F_G = k \frac{4}{3} \pi R_k^3 \rho g \quad (1)$$

kde  $k$  je součinitel, charakterizující jaká část tekutého kovu zůstane po odtržení kapky na elektrodě  
 $R_k$  je poloměr kapky  
 $\rho$  je měrná hmotnost roztaveného kovu  
 $g$  je zemské zrychlení

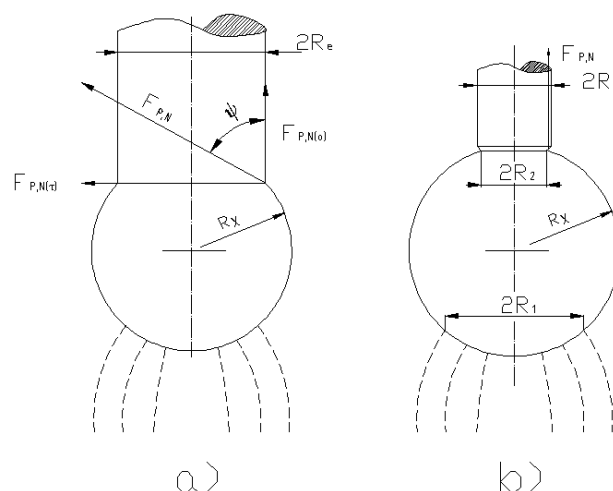
Síla povrchového napětí ztěžuje přenos kapek z elektrody do svarové lázně. Před vytvořením krčku můžeme předpokládat, že síla působí v místě přechodu mezi kapkou a nenataveným materiálem elektrody a má směr tečny ke kapce. Sílu povrchového napětí je možno rozložit na osovou a radiální složku. Osová složka síly povrchového napětí  $F_{P,N(o)}$  je dána vztahem (2), radiální složka  $F_{P,N(r)}$  vztahem (3):

$$F_{P,N(o)} = 2\pi\sigma R_e \cos \Psi \quad (2)$$

$$F_{P,N(r)} = 2\pi\sigma R_e \sin \Psi \quad (3)$$

kde  $\sigma$  je součinitel povrchového napětí  
 $R_e$  je poloměr elektrody  
 $\Psi$  je úhel mezi tečnou k povrchu kapky v místě přechodu kapky do nenataveného materiálu a povrchem elektrody





- a) do vytvoření kapky  
b) po vytvoření krčku

Obr. 1 Schéma sil povrchového napětí působících na kapku

Radiální složka síly povrchového napětí  $F_{P,N(r)}$ , daná vztahem(3), se snaží stlačit kapku a vytvořit krček. Po vytvoření krčku lze za místo působení síly povrchového napětí uvažovat minimální průřez krčku.

Elektromagnetická síla je výsledkem vzájemného působení elektrického proudu a magnetického pole, které elektrický proud vyvolává při průchodu daným prostředím. U vodiče s konstantním průřezem má elektromagnetická síla směr kolmý k ose vodiče a snaží se vodič stlačit. Pokud není průřez vodiče konstantní, tak jako je tomu při tvorbě kapky na konci elektrody, má elektromagnetická síla radiální a axiální složku. Radiální složka působí proti zmenšování průřezu krčku a axiální složka ovlivňuje přenos kapky podél osy elektrody.

Velikost axiální síly se určí podle vztahu (4):

$$F_{EM} = \frac{\mu I^2}{4\pi} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (4)$$

kde  $\mu$  je permeabilita  
 $I$  je svařovací proud  
 $R_1$  je poloměr krčku (před vytvořením krčku je to poloměr elektrody)  
 $R_2$  je poloměr aktivní skvrny na kapce

Směr axiální síly je určen poměrem poloměrů krčku a aktivní plochy na kapce. V případě, že poloměr aktivní skvrny na kapce je větší než poloměr krčku, elektromagnetická síla podporuje přenos kapky do svarové lázně.

Procesy odehrávající se v oblasti aktivních skvrn na elektrodách probíhají při teplotě blízké teplotě varu elektrodového materiálu. Z aktivních skvrn proto dochází k intenzivnímu vypařování kovu a často i k uvolňování plynů. Směr pohybu par je nejprve kolmý na povrch, ze kterého unikají. Vznikající páry a plyny se v prostředí elektrického oblouku ionizují a jejich další pohyb je určen magnetickým polem v elektrickém oblouku. Reaktivní sílu vyvolanou odpařováním kovu z povrchu kapky se vyjádří vztahem (5):

$$F_R = Mv \quad (5)$$

kde  $M$  je hmotnost odpařeného kovu za jednotku času

$v$  je počáteční rychlost proudu par

Podobně lze vyjádřit reaktivní sílu vyvolanou uvolňováním plynů z kapky. Reaktivní síla je významným činitelem při svařování ocelí s vyšším obsahem uhlíku z důvodu tvorby oxidu uhelnatého. Při svařování nízkouhlíkatých ocelí je oxidace nepatrná. V tomto případě reaktivní sílu tvoří především vypařování kovu. Reaktivní síla může způsobovat vychylování kapky z osy elektrody.

Silové působení plazmových toků lze vyjádřit vztahem (6):

$$F_p = M_p v \quad (6)$$

kde  $M_p$  je hmotnost plazmatu procházejícího daným průřezem ze jednotku času

$v$  je rychlost plazmatu v daném průřezu

Tok plazmatu napomáhá při odtrhávání kapky a uděluje kapce další zrychlení. Při obtékání kapky je kapka unášena ve směru proudění plazmatu. Tento účinek je také nazýván magnetokinetická síla, protože plazma je uváděno do pohybu magnetickým polem. Účinek plazmového toku je významný u sprchového přenosu kovu, kdy kov přechází do svarové lázně současně více drobnými kapkami.

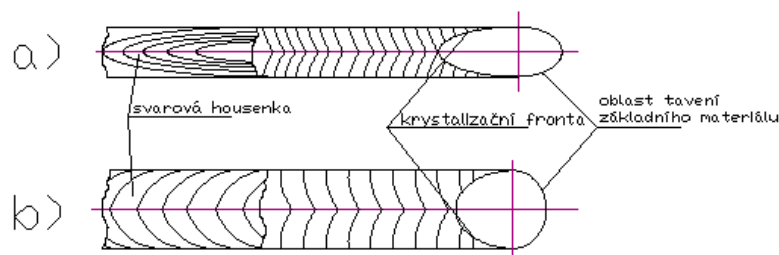
## 2.3 Krystalizace svarového kovu spoje [1]

Krystalizace svarového spoje probíhá za ohniskem působení koncentrovaného zdroje tepla a před ohniskem probíhá tavení základního materiálu. V objemu odpovídající svarové lázni se mění velikost i směr teplotního gradientu. Směr růstu krystalů se mění v závislosti na obrysu svarové lázně. Hlavní osa rotujícího krystalu je v každém časovém okamžiku a místě kolmá na krystalizační frontu. To znamená kolmá na obrys svarové lázně.

### 2.3.1 Vliv svařovací rychlosti na tvar svarové lázně a orientaci a tvar dendritů [1]

Svařovací rychlost má vliv na tvar svarové lázně a orientaci dendritů. Vyšší rychlost svařování vede k protáhlé svarové lázni a krystaly tuhnutí kovu se v osové rovině stýkají téměř čelně. Tento typ dendritické orientace je méně příznivý, protože nečistoty, které představují nízkotající fáze, jsou tlačeny před krystalizační frontu. V rovině styků krystalů se mohou nahromadit odměšující se škodlivé fáze a tím se vytvářejí příznivé podmínky pro vznik podélně orientovaných krystalizačních trhlin.

Při nižších svařovacích rychlostech se tvoří tavná lázeň oválného tvaru a krystaly se v osové rovině stýkají pod ostrým úhlem. Tím se snižuje pravděpodobnost vzniku krystalizačních trhlin.



Obr. 2 Vliv rychlosti svařování na tvar svarové lázně a orientace dendritů

Výrazné ovlivnění krystalizace svarového kovu spoje umožňuje svařování pulsujícím elektrickým obloukem. Základní materiál se natavuje v době proudového impulsu a v době základního proudu předává elektrický oblouk tak málo tepla, že se svarová lázeň ochlazuje a tuhne. Svar je tvořen z překrývajících se svarových čóček, jejichž překrytí závisí na parametrech pulsačního svařování. Vzhled svaru při různém překrytí schematicky znázorňuje obr. 3. V případě obr. 3a) se jednou znovu přetaví pouze malá část objemu svarové čóčky. V případě obr. 3b) se ve značné části svarové čóčky provede dvojnásobné přetavení.



Obr.3 Charakter překrytí svarových čóček při impulsním svařování

Rozdíly v překrytí čóček mají vliv na strukturní stavbu svarového kovu spoje i charakter teplem ovlivněné oblasti.

Rozměr dendritů, vznikajících při krystalizaci svarového kovu spoje, je především závislý na celkovém objemu svarové lázně a s tím spojené nižší rychlosti ochlazování. Průběh krystalizace svarového kovu spoje je charakterizován mechanismem heterogenní nukleace na hranici ztavení. Částečně natavená zrna základního materiálu slouží jako krystalizační podložky a na nich krystalizuje roztavený kov ze svarové lázně. Růst krystalů se vyznačuje kolísavým průběhem rychlosti růstu a to i v případech, kdy přívod energie i pohyb tepelného zdroje jsou spojitě a rovnoměrné. V určitých intervalech rychlost růstu krystalů roste a potom zase klesá. Může dojít i k částečnému odtavení špiček krystalů na čele krystalizační fronty. Při dostatečném podchlazení taveniny začnou krystaly růst ve směru hlavní osy zvýšenou rychlostí směrem do taveniny. Hlavní faktor zpomalení růstu krystalů má teplotní charakter. Rostoucí krystaly se svým čelem dostanou do oblasti taveniny s vyšším stupněm přehřátí a růst ve směru hlavní osy se prakticky zastaví. Ale růst krystalů pokračuje do stran a to umožňuje, aby krystalizovala i tavenina obohacená o prvky vytěsněné v první etapě. Přestávky v růstu krystalů umožňují průběh difuzních procesů na rozhraní tekuté a tuhé fáze například pronikání plynů z přesyceného tuhé roztoku do taveniny. Může také probíhat nukleace plynových bublin a jejich unikání z taveniny, eventuálně koagulace tekutých nekovových vměstků a jejich vyplouvání do strusky. Charakter procesu krystalizace vede k vytváření chemické heterogenity svarového kovu spoje. Vytvářejí se pásma obohacená o segregující prvky, vyloučené vměstky a mikroskopické dutinky.

Přetržitým charakterem růstu krystalů lze vysvětlit i tvorbu reliéfu povrchu svarového kovu spoje. Tavenina obohacená o příměsi vytěsněné v etapě zrychleného růstu krystalů má

nižší povrchové napětí a klade menší odpor vůči smršťování při krystalizaci. Proto se v etapě zpomaleného růstu krystalů vytváří sestupný svah reliéfu.

## 2.4 Měrné vnesené teplo [1]

Při svařování se k ohřevu svařence využije pouze část energie elektrického oblouku. Část energie se využívá na ohřev a tavení elektrody, tavidla a na úhradu ztrát konvekcí a radiací. Efektivní tepelný výkon svařovacího elektrického oblouku je množství tepelné energie přenesené do svařence za jednotku času a vyjadřuje se vztahem (7) :

$$q = \eta \zeta UI \quad (7)$$

kde :  $\eta$  je součinitel tepelného výkonu svařovacího oblouku (účinnost ohřevu součástí elektrickým obloukem)  
 $\zeta$  je součinitel vyjadřující vliv skutečného tvaru křivky napětí a křivky proudu (pro stejnosměrný proud je  $\zeta = 1$ )  
 $U$  je napětí elektrického oblouku [V]  
 $I$  je svařovací proud [A].

Součinitel tepelného výkonu svařovacího oblouku  $\eta$  je poměr tepla, které přejde do svařovaného materiálu v procesu svařování a celkového tepelného ekvivalentu elektrického oblouku. Součinitel tepelného výkonu svařovacího oblouku závisí na metodě a technologických podmínkách svařování. Nejvyšší účinnosti se dosahuje při svařování pod tavidlem od 0,8 do 0,95. U metody svařování obalenými elektrodami se účinnost pohybuje mezi 0,75 a 0,85.

## 2.5 Automatizace

Pro svařování se používají svařovací poloautomaty a automaty. Svařování MAG je univerzální metoda, kterou je možno navařovat svarový kov ve větším množství a ve všech svařovacích polohách. Svařování MAG lze plně automatizovat ve spojení s vhodnými roboty a manipulátory. U zařízení pro svařování MAG se nenastavuje svařovací proud, ale délka oblouku - prostřednictvím napětí na oblouku. Požadovaná velikost svařovacího proudu se nastaví rychlostí podávání drátu. Plochá charakteristika umožňuje samoregulaci délky oblouku, takže změna délky oblouku má za následek velkou změnu proudu a tím se zrychlí nebo zpomalí odtavování elektrody.

Metoda MAG je vhodná pro svařování uhlíkových i slitinových ocelí. Výkon odtavení je podstatně vyšší, než při svařování obalovanou elektrodou a ekonomičnost této metody může ještě zlepšit vhodná konstrukce spojů, která bere v úvahu relativně veliký závar. Jako přídavný materiál se obvykle používá svařovací drát (relativně malého průměru – 0,8 až 1,6 mm) nebo trubičková elektroda odvíjející se ze zásobníku a bowdenem se vede do svařovacího hořáku. (Proud se přivádí kluzným kontaktem ze slitiny CuBe, CuCr ..., která je dobře vodivá a tvrdá, odolná proti opotřebení) [1],[2].

## 2.6 Trubičkový drát [2]

Svařování trubičkovým drátem je jednou z variant procesu MAG. Trubičkové dráty mají plášť z ocelového pásu, který je sbalen do trubičky. Náplň obsahuje legující, struskotvorné a dezoxidační prvky a sloučeniny. Tento způsob se používá pro svařování a navařování speciálních svarů a návarů. Při svařování zvyšuje produktivitu o 20 %.

Nevýhodou je vznik značného množství exhalací, které je nutno odsávat. Ochranný plyn se dodává buď samostatně (trubičkový drát je určen pro svařování v ochranné atmosféře) nebo vzniká rozkladem přísad z náplně (trubičkový drát s vlastní atmosférou). Trubičkové dráty se dělí na dráty s nekovovou náplní-bazickou, rutilovou, dále s kovovou náplní. Existují i trubičkové dráty samoochranné, použitelné bez ochranného plynu.

Kromě ochranného plynu produkuje trubičkový drát strusku, která slouží jako další ochrana při chladnutí svarového kovu a poté se z jeho povrchu odstraní.

## **2.7 Vznik svarového spoje [1]**

Při procesu tavného svařování probíhá natavení svarových ploch, případně i přídavného materiálu působením koncentrovaného zdroje tepla. Ve svarové lázni probíhají fyzikálně metalurgické pochody-dochází k promíchávání tekutého kovu, k sdílení tepla, metalurgickým reakcím mezi roztaveným kovem a okolním prostředím ( atmosféra, roztavené tavidlo nebo obal elektrody), jejichž výsledkem může být výrazná změna chemického složení svarového kovu spoje, například legováním strusky, absorpcí plynů. Další z důležitých pochodů probíhající při tavném procesu je formování povrchu svarové lázně účinkem všech působících sil (gravitační síly, dynamický účinek plynů a kovových par) a účinkem mezifázových napětí: tekutý kov-tuhá fáze, tekutý kov-roztavená struska, tekutý kov-okolní plynové prostředí a krystalizace svarového kovu spoje a jeho chladnutí odvodem tepla do základního materiálu a okolního prostředí.

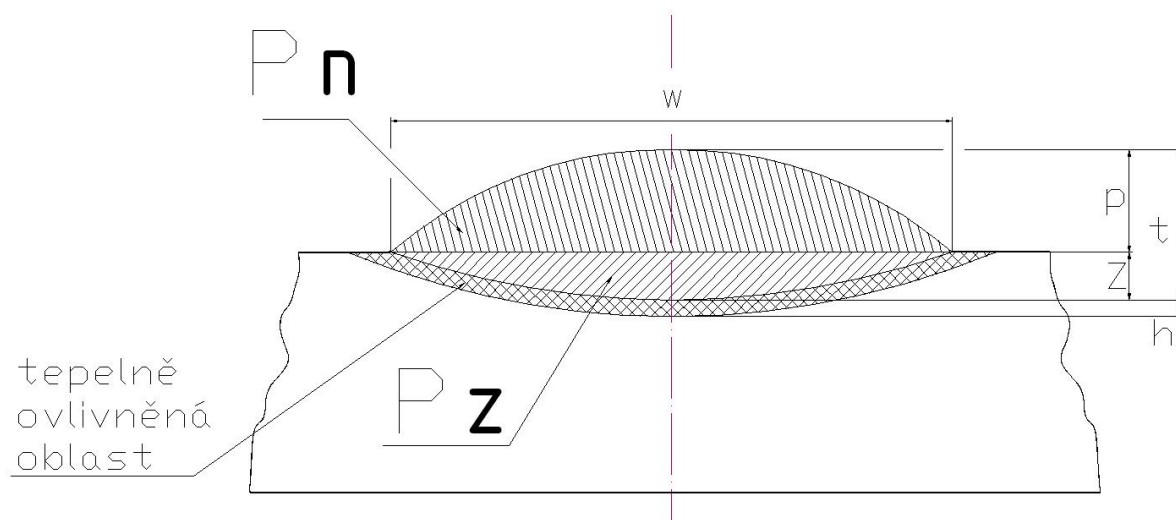
Svarový kov spoje je kov odtavený z přídavného materiálu a promíšený se základním materiálem nebo pouze přetavený základní materiál. Vlastnosti, chemické složení, struktura svarového spoje závisí na složení a vlastnostech svarového spoje kovu, složení a vlastnostech základního materiálu, metalurgických reakcích, probíhajících mezi kovem ve svarové lázni a okolním prostředím (struskou, atmosférou) a na průběhu krystalizace.

### **2.7.1 Vznik svarového spoje při použití trubičkových elektrod**

Při svařování speciálními trubičkovými elektrodami je složení svarového kovu výrazně závislé na jednak chemické složení samotné elektrody a složení výplně elektrody a také na technologických parametrech svařování, které mají vliv na průběh metalurgických reakcí při tavení přídavného materiálu. [2]

### **2.7.2 Zředění svarového kovu nataveným základním materiálem [1]**

Chemické složení svarového kovu spoje je určeno stupněm promíšení svarového kovu odtaveného z přídavného materiálu a roztaveným základním materiálem. Stupeň promíšení výrazně závisí na metodě svařování a technologických podmínkách. Pro stanovení hodnoty zředění (anglicky dilution) se provádí praktická zkouška. Praktická zkouška spočívá v tom, že se provede řez v rovině kolmé na podélnou osu svaru. Řez se vybrousí a naleptá. Po naleptání můžeme určit plochu závaru  $P_z$  a plochu návaru  $P_n$ .



Obr.4 Příčný řez návarem

$P_n$  - plocha návaru,  $P_z$  - plocha závaru,  $p$  - převýšení,  $z$  – závar,  $t$  – celková výška návaru,  $h$  – výška tepelně ovlivněné oblasti

Hodnota zředění  $D$  udává podíl základního materiálu ve svarovém kovu spoje a lze vyjádřit vztahem (8),

$$D = \frac{P_z}{P_n + P_z} 100[\%] \quad (8)$$

kde  $P_n$  je plocha návaru,  
 $P_z$  je plocha závaru.

## 2.8 Navařování litiny

### 2.8.1 Charakteristika litiny

Litiny jsou slitiny železa s uhlíkem a některými dalšími prvky (Si, Mn, P, S, atd.), kde je obsah uhlíku větší než 2,11% C. Konkrétní obsah prvků je závislý na druhu litiny. Litiny se dělí na grafitické a bílé. Bílé litiny nemají v dnešní době velký praktický význam, protože jsou nahrazovány některými grafitickými litinami [5].

### 2.8.2 Grafitické litiny [5]

Grafitické litiny se dělí na litiny s lupínkovým grafitem (LLG), litina s červíkovým grafitem (LČG), litiny s kuličkovým grafitem (LKG).

Strukturu litiny tvoří grafit, základní kovová hmota-matrice, a nevhodné strukturní součásti - jsou často nevhodné (steadit, sulfidy a další).

Grafit v litině je elementární uhlík, krystalizující v hexagonální soustavě. Vzniká při eutektické přeměně litiny podle stabilního diagramu Fe-C a zůstává ve struktuře litiny bez ohledu, zda li další přeměna probíhala podle stabilního nebo metastabilního diagramu Fe-C . Grafit má v porovnání s kovovou maticí litiny téměř zanedbatelnou pevnost.

Základní kovová hmota může být podle způsobu transformace austenitu vzniklého při eutektické krystalizaci litiny: feritická, feriticko-perlitická, perlitická, ve zvláštních případech

bainitická nebo martenzitická. Současně se mohou ve struktuře litiny objevovat i další strukturní součásti jako například cementit. Ferit ve struktuře litin snižuje pevnost v tahu, tvrdost a odolnost proti opotřebení, ale zvyšuje tvárné vlastnosti a vrubovou houževnatost litin. Ferit je u litin definován jako tuhý roztok uhlíku a křemíku v  $Fe_\alpha$ .

Volný cementit v litině je nežádoucí, neboť se vyznačuje tvrdostí a křehkostí a nízkou obrobiteľností a nemá skoro žádnou tvárnost.

Steadit je ternární fosfidické eutektikum, které je směsí  $Fe-Fe_3C-Fe_3P$ . Ve struktuře litiny se objevuje ve formě pavučinek. Toto nepříjemné eutektikum se vyskytuje při vyšším obsahu fosforu, tj. od 0,3% . Má nízkou teplotu tání – 950°C a je velmi tvrdou a nepříznivou strukturní složkou litin.

### 2.8.3 Predikce struktury svarového kovu [6]

U vícevrstevných svarů neplatí pro všechny vrstvy, že složení, mikrostruktura a vlastnosti jsou homogenní. Je třeba předpokládat jiné složení svarového kovu v kořenové oblasti, a jiné v oblasti krycích vrstev a jiné ve středu průřezu. Složení jednotlivých vrstev svaru můžeme odhadnout nebo vypočítat nebo odečíst ze Schaefflerova diagramu - viz článek 2.8.3.1 a 2.8.4, když známe chemické složení obou základních materiálů, chemické složení přídavného materiálu a stupeň zředění svaru z každé strany svařované dvojice svařenců. Zředění svaru můžeme odměřit z příčného makrovýbrusu zkoušeného svaru.

Na obr. 5 je znázorněno schéma příčných řezů tupým a koutovým svarem. Zředění svarového kovu materiálu části A se může vyjádřit poměrem:

$$\frac{A}{[A + B(F_1 + F_2)]} * 100[\nu\%] \quad (9)$$

A podobně zředění materiálem B je dáno výrazem:

$$\frac{B}{[B + A(F_1 + F_2)]} * 100[\nu\%] \quad (10)$$

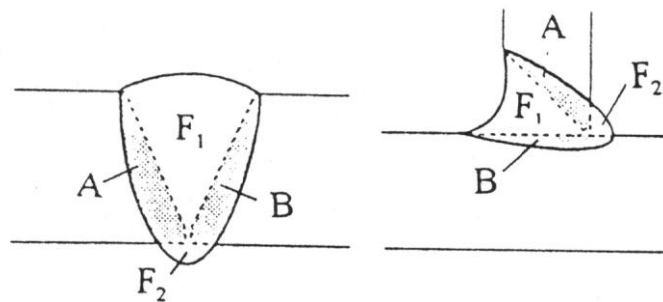
A celkové zředění výrazem:

$$\frac{A + B}{[(A + B)(F_1 + F_2)]} * 100[\nu\%] \quad (11)$$

Podle Americké svářečské společnosti (AWS) lze vypočítat obsah některého z prvků ve svarovém kovu podle rovnice (12) :

$$X_w = (D_A)(X_A) + (D_B)(X_B) + (1 - D_T)(X_F) \quad (12)$$

kde  $X_w$  je průměrný obsah prvku X ve svarovém kovu,  $X_A$  je obsah prvku X v základním materiálu A,  $X_B$  je obsah prvku X v základním materiálu B,  $X_F$  je obsah prvku v přídavném materiálu,  $D_A$  je zředění kovem A,  $D_B$  je zředění kovem B,  $D_T$  je celkové zředění kovy A a B.

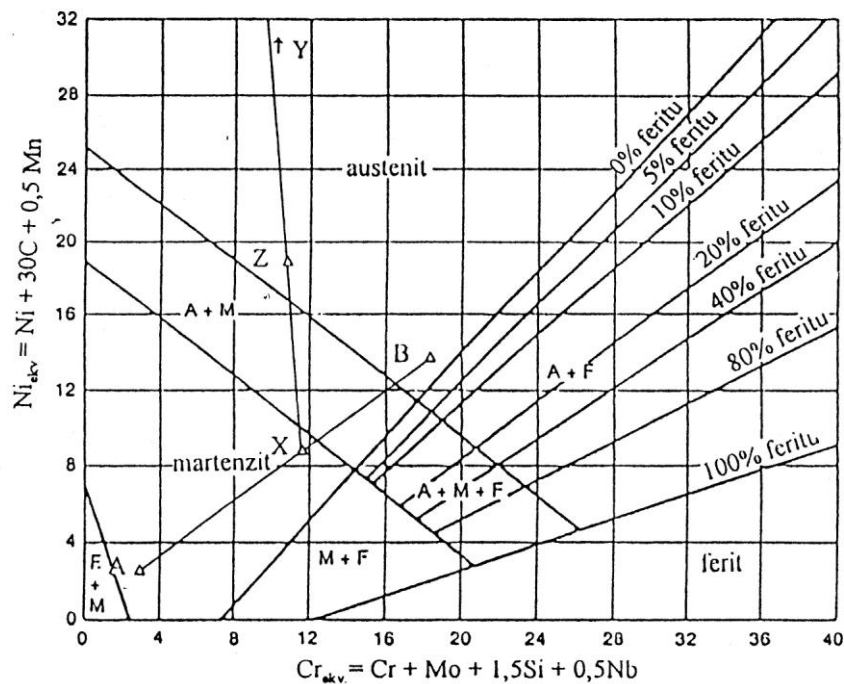


Obr. 5 Schéma příčného řezu tupým a koutovým swarem

### 2.8.3.1 Grafické řešení - příklad

Pro názornost provedeme ukázkou predikce struktury z Schaefflerova diagramu. Cílem je zjistit chemické složení svarového kovu při svařování austenitické nerezové ocele 17247.4 s nízkolegovanou kotlovou ocelí 15313.3 niklovou elektrodou VZU 60. Do Schaefflerova diagramu - viz obr. 6. se zakreslí bod, charakterizovaný chromovým a niklovým ekvivalentem konstrukční ocele 15313 (označení A), dále bod, charakterizovaný chromovým a niklovým ekvivalentem austenitické nerezavějící ocele 17247 (označení B). Na spojnici těchto dvou bodů bude ležet bod, který vyznačuje chemické složení svarového kovu. Jestliže přihlédneme k nižší teplotě tavení austenitické ocele, potom můžeme uvažovat promíšení 45% konstrukční ocele a 55% austenitické ocele. Tento bod se zakreslí do vyznačené úsečky jako bod X. Do diagramu se dále zakreslí poloha bodu, který charakterizuje složení přídavného materiálu – elektrody VZU 60 jako bod Y. Pokud odhadneme stupeň zředění svarového kovu vytaveného touto elektrodou oběma základními materiály na 70%, pak lze na úsečce XY vyznačit bod Z, charakterizující složení svarového kovu a zjistíme odpovídající mikrostrukturu tomu bodu. Při zjišťování složení dalších vrstev svaru, použije-li se vícevrstvý svar, postupujeme obdobně. [6]





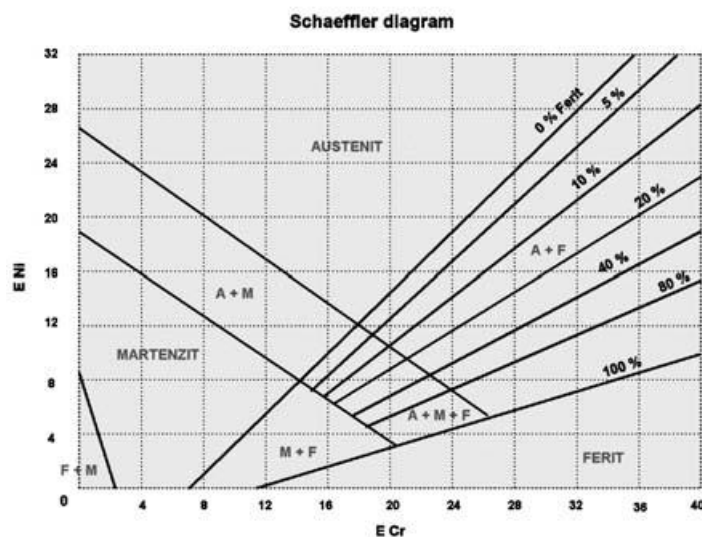
Obr. 6 Schaefflerův diagram pro nerezavějící ocele

#### 2.8.4 Proces navařování

Při navařování návaru na litinu tvoří tavná lázeň, v níž se smíchává litina a antikorozní návar. V tepelně ovlivněné oblasti je struktura odlišná od litiny. Tvoří se tvrdé struktury jako ledeburit, steadit, martenzit.

Samotné vlastnosti vzniklého návaru závisí na stupni zředění D, tedy v jakém množství se promíchal základní materiál s návarovým.

Je možné teoreticky vypočítat podle Schaefflerova diagramu viz obr. 8 vzniklou tvrdost návaru v závislosti na stupni zředění D, tedy na výsledném složení návaru v závislosti na tom, kolik je v něm rozpuštěno litiny.



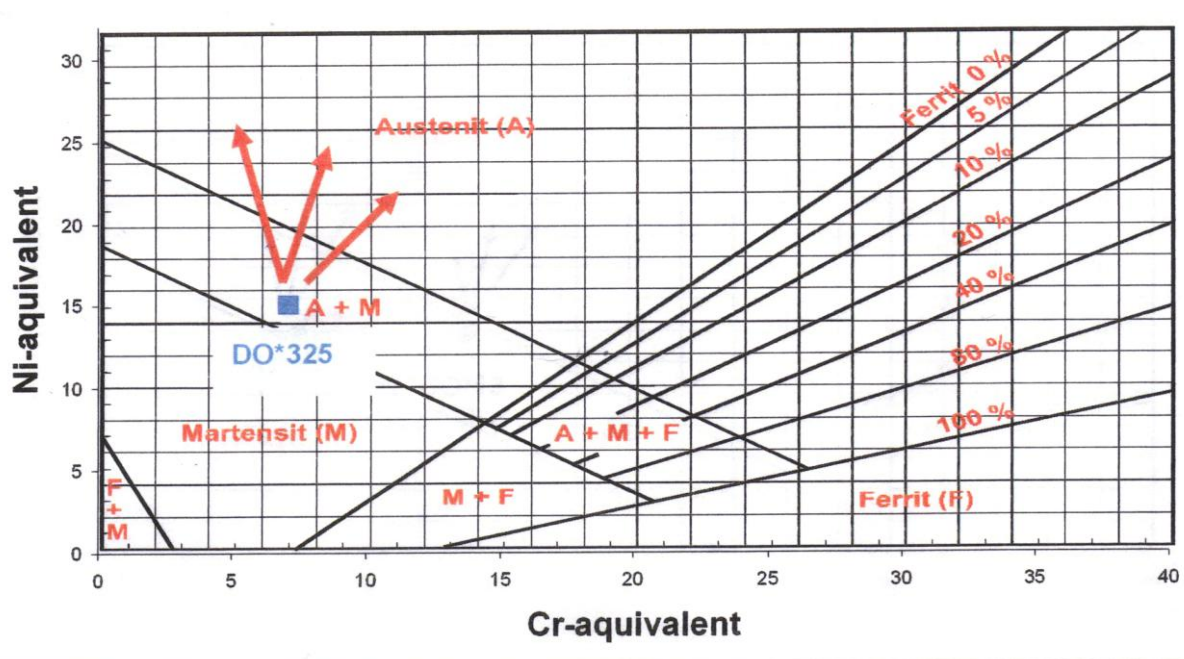
Obr. 7 Schaefflerův diagram

Na vodorovné ose je chromový ekvivalent, který se vypočte podle vztahu (13) :

$$Cr_{ekv} = \%Cr + 1,5\%Si + 0,5\%Nb \quad (13)$$

a na svislé ose se nachází niklový ekvivalent, který se vypočte podle vztahu (13):

$$Ni_{ekv} = \%Ni + 30\%C + 0,5\%Mn \quad (14)$$



Obr. 8 Schaefflerův diagram – předpokládaná struktura v třetím návaru při navařování trubičkovým drátem řady EnDOtec DO\*325 odpovídá bodu DO\*325 (modrý čtvereček) na obrázku Schaefflerova diagramu

V první vrstvě návaru se složení návaru většinou nachází hluboko v oblasti austenitu. To je struktura s nízkou tvrdostí. V druhé a třetí vrstvě návaru se zředění snižuje a podle Schaefflerova diagramu by se složení návaru měla postupně blížit až se dostat do oblasti, kde se vyskytuje austenit a martenzit. Vlivem martenzitu bude návar v následujících vrstvách vykazovat vyšší tvrdost. Je užitečné, aby první vrstva byla nejměkčí a vyšší vrstvy byly tvrdší. Poslední vrstvy návaru budou chránit základní materiál před otěrem a zároveň první vrstva bude návaru zajišťovat houževnaté vlastnosti, které jsou užitečné při dynamickém namáhání.

### 3. Experimentální část práce

#### 3.1 Cíl práce

Naplánovat a provést soubor experimentů – jednohousenkových návarů trubičkovým drátem EnDOtec DO\*325 na blok kuličkové litiny za použití různých kombinací parametrů svařování a sledovat a posoudit:

1. Geometrii návaru – tvar, plochu, šířku, zředění, převýšení, závar, poměr šířky housenky k převýšení a závaru, šířka TOO (tepelně ovlivněná oblast),
2. Kvalitu návaru - zejména přítomnost trhlin a jejich možný původ, tvrdost návaru, u vytýpovaných návarů mikrotvrdost přechodu materiál – návar a mikrostrukturu návaru, TOO a základního materiálu.

Závěrem doporučit rozsah svařovacích podmínek a parametrů pro efektivní zhotovení kvalitního návaru.

#### 3.2 Rozbor podmínek navařování litiny

Litina je velmi křehký materiál a navíc obsahuje vysoké procento uhlíku, které se při obloukovém svařování promísí s návarem a může přispět i k jeho zkřehnutí. Proto se doporučuje vytvořit první vrstvu návaru velmi tažnou slitinou, která absorbuje zbytková napětí po svařování.

Dále se doporučuje minimální promíšení návaru se základním materiálem a pokud nelze zaručit – u obloukových metod svařování drátem, vytvořit minimálně 3 vrstvy návaru, protože teprve 3. vrstva bude mít vlastnosti návaru.

Tím byla daná koncepce návarů trubičkovými dráty řady EnDOtec firmy Castolin.

Použitý trubičkový drát EnDOtec DO\*325 má následující složení:

0,0075 % C ; 0,6 % Si; 1,55 % Mn; 5,5 % Cr; 12,1 % Ni; 0,7 % Mo a zbytek Fe.

Svarový kov tohoto přídavného materiálu má austenitickou strukturu s malým podílem martenzitu, takže dosahuje tvrdosti 37 HRC. V první vrstvě by tak tvrdý návar způsobil praskliny, ale protože se promísí s cca 30 % materiálem litiny s obsahem uhlíku kolem 3 %, zvýší se jeho Ni-ekvivalent a výsledná struktura je austenitická, stejně tak u druhé vrstvy. Teprve třetí vrstva, kde podíl zředění základním materiálem nepřevyšuje 3 %, vznikne požadovaná austeniticko-martenzitická struktura.

Návar by měl mít ploché – rovnoměrné převýšení i hloubku závaru, co nejužší TOO a co nejmenší rozdíl v tvrdosti TOO proti základnímu materiálu.

Produktivita navařování by měla být co nejvyšší.

##### 3.2.1 Podmínky návrhu experimentu

Výkon navařování a zároveň stupeň promíšení je dán velikostí proudu, která v návaznosti umožní zvýšit rychlost navařování, která též zvyšuje stupeň promíšení. To znamená, že při navařování první vrstvy se musí zvolit kompromis mezi produktivitou a promíšením. Velikost proudu i rychlost určuje i hloubku závaru a výšku převýšení, takže vysokým proudem se vytvoří úzká housenka s vysokým návarem a hlubokým závarem. Jediný způsob, jak housenku rozšířit a zploštit je rozkvyv hořáku.

Z toho vyplývá volba parametrů svařování – proud, (napětí), rychlost navařování a rozkvyv hořáku. Režim navařování připadá v úvahu pouze zkratovým nebo pulzním přenosem kovu.

V předcházející diplomové práci byl proveden soubor experimentů zkratovým režimem, při volbě kombinací proudu, napětí a rychlosti navařování.

Tato bakalářská práce na základě předchozích závěrů vychází ze synergického režimu, ověřeného firmou Castolin. To znamená, že jsme svařovali přímo v sídle zastoupení firmy Castolin v Praze, na zdroji Totalarc 4000, vybaveným programem č. 41, vytvořeným pro tento drát. S doporučeným ochranným plynem Arcal 12 (Ar, 2% CO<sub>2</sub>), pulzním režimem svařování. Použili jsme i jejich lineární dráhu, která byla nastavena na jednu rychlost navařování – 18,7 cm/min, ale za to zde bylo možno měnit rozkvyv hořáku od 0 do 20mm – viz obr. 9.



Obr. 9 pracoviště firmy Castoline

Byly přivezeny 2 bloky litiny o rozměrech 25 x 12 x 4 cm. Jeden pro zkušební návary a jeden pro experimentální program podle metodiky DOE. Na rozdíl od předchozích experimentů jsme neprováděli předehřev ani temování. Dále jsme si vzali vlastní monitorovací zařízení pro měření proudu, napětí, rychlosti drátu a průtoku plynu. Počet housenek byl omezen návarovou plochou a domluveným časem, takže jsme neprováděli třívrstvý návar. Fotografie návarových housenek jsou uvedeny v příloze 1.

### 3.3 Plán experimentu

Použitý zdroj se synergickým režimem a lineární dráha omezily parametry svařování na proud a rozkvyv hořáku.

V první sadě byl prověřen rozsah proudu od 130A do 400A, u vyšších proudů byl otestován maximální rozkvyv 20mm.

Ve druhé sadě byl proveden plán experimentů podle centrální kompozice pro 5 hladin proudu a 5 hladin rozkvyvu.

### 3.4 Výsledky navařování litiny s kuličkovým grafitem

Makrostruktury všech návarů s uvedením čísla svaru jsou uvedeny v příloze 2.

Vstupní parametry, vypočtené a naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 1.

**Tabulka 1 s naměřenými parametry**

Návar		$V_d[m/min]$	$V_s[m/min]$	$U_p[V]$	$I[A]$	rozkv[mm]	$Q[J]$	$P_n[mm^2]$	$P_z[mm^2]$	$P_z[mm^2]$	$D_m[\%]$	$P_r/P_m$	$p'[mm]$	$z'[mm]$	$t'[mm]$	$h[mm]$	$w[h[1]$	$w/p[1]$	$w/z[1]$	trhlíny	HRC
M1		1,64	0,187	22,7	138	0	8,44	13,23	13,32	4,90	27,03	1,01	1,5	0,6	2,1	0,46	18,8	5,6	15,2	0	11
M2		7,67	0,187	30,6	315	0	25,98	61,86	72,21	46,90	43,12	1,17	2,9	2,2	5,1	0,37	57,8	7,4	9,7	2	25
M3		4,59	0,187	27,3	223	0	16,41	37,02	38,76	22,69	38,00	1,05	2,3	1,4	3,7	0,42	37,5	6,7	11	0	21
M4		4,59	0,187	27,3	223	0	16,41	37,02	35,59	22,66	37,97	0,96	2,4	1,5	3,9	0,61	25,6	6,6	10,7	1	19
M5		4,59	0,187	27,3	223	0	16,41	37,02	37,12	16,30	30,57	1,00	2,6	1,1	3,7	0,52	27,8	5,7	12,8	0	15
M6		3,60	0,187	25,1	204	20	13,80	29,03	29,25	14,56	33,40	1,01	1,1	0,6	1,7	0,35	74,8	23,6	47,1	2	16
M61		6,95	0,187	27,8	291	20	21,80	56,05	65,17	47,60	45,92	1,16	1,8	1,5	3,3	0,57	54,4	17,1	20,2	2	20
M7		12,30	0,187	36	400	20	38,81	99,20	113,76	71,92	42,03	1,15	2,7	2	4,7	0,49	75	13,6	18,8	2	30
M8	7	6,08	0,187	28,1	254	0	19,24	49,04	47,39	22,30	31,26	0,97	3,1	1,4	4,5	0,50	31,2	5	10,9	0	21
M9	1	2,94	0,187	24,6	178	3	11,80	23,71	23,04	8,02	25,27	0,97	2,3	0,8	3,1	0,50	21	4,7	13,8	1	18
M10	3	9,22	0,187	33,8	326	3	29,70	74,36	84,68	50,45	40,42	1,14	2,9	2	4,9	0,48	52,7	8,6	12,7	1	22
M11	5	1,63	0,187	22,5	128	10	7,76	13,15	13,00	4,99	27,51	0,99	1,2	0,4	1,6	0,43	26,1	9,6	25,3	0	10
M13	6	11,36	0,187	36,2	377	10	36,78	91,62	100,59	65,41	41,65	1,10	3,1	2,2	5,3	0,47	63,7	9,8	13,7	0	23
M14	9	6,08	0,187	28,2	250	10	19,00	49,04	49,80	23,92	32,79	1,02	2,3	1,1	3,4	0,69	30,7	9,2	18,8	0	15
M15	2	2,96	0,187	24,2	173	17	11,28	23,87	24,97	9,28	27,99	1,05	1,2	0,4	1,6	0,41	50,4	17,9	46,1	0	12
M16	4	8,70	0,187	33,1	322	17	28,73	70,17	77,77	45,27	39,22	1,11	2,3	1,5	3,8	0,49	62,3	13,3	20,6	0	22
M17	8	6,09	0,187	28,1	254	20	19,24	49,12	52,83	24,68	33,44	1,08	1,7	0,9	2,6	0,55	51,9	16,6	33	0	20

kde  $v_d [\frac{m}{min}]$  je rychlost odtavujícího se drátu,  $v_s [\frac{m}{min}]$  je rychlost svařování,  $U_p [V]$  je pracovní napětí,  $I [A]$  je elektrický proud,  $Q$  je vnesené měrné teplo na 1 cm svaru a je dáno vztahem:

$$Q = 0,06 * 0,84 * \frac{U_p * I}{v_s} \quad [ \frac{kJ}{cm} ] \quad (15)$$

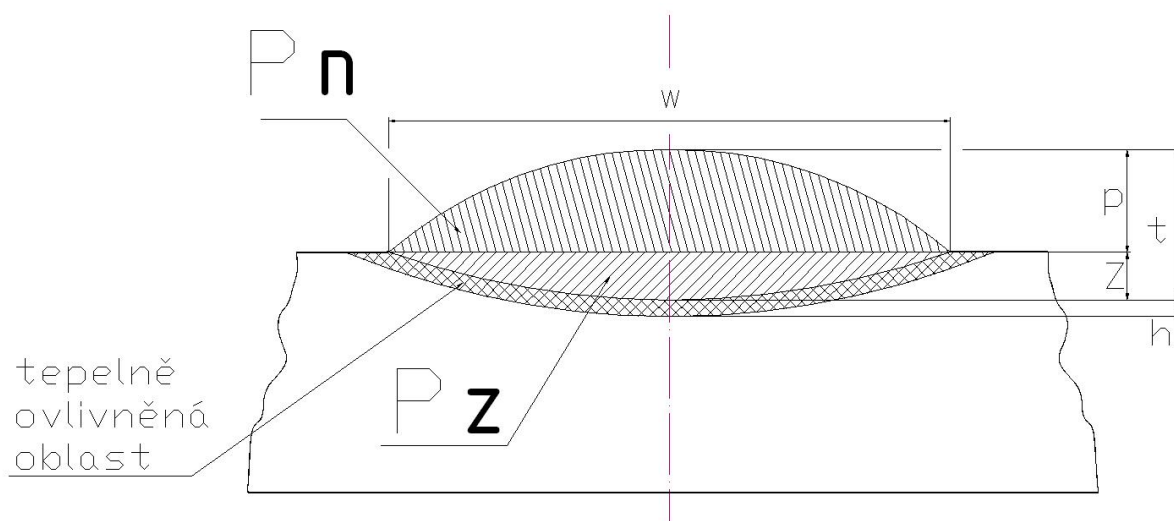
kde  $r$  je poloměr drátu,  $P_m$  je teoreticky spočítána hodnota plochy návaru daná vztahem:

$$P_m = 0,75 * \pi * r^2 * \frac{v_d}{v_s} \quad [mm^2] \quad (16)$$

$P_n[mm^2]$  je hodnota naměřené plochy návaru,  $P_z[mm^2]$  je hodnota naměřené plochy závaru,  $w [mm]$  je šířka svarové housenky,  $p[mm]$  je převýšení v ose návaru,  $z [mm]$  je výška v ose závaru,  $t [mm]$  je celková výška svaru daná jako součet  $p$  a  $z$ ,  $D_m [\%]$  je zředění,  $h [mm]$  je výška tepelně ovlivněné oblasti,  $p' [mm]$  je průměrné převýšení, dané vztahem  $p' = \frac{P_m}{w}$  (17),

$z' [mm]$  je průměrný závar daný vztahem  $z' = \frac{P_z}{w}$  (18), a  $t' [mm]$  vztahem  $t' = p' + z'$  (19),

rozkv [mm] znamená rozkyv hořáku, HRC znamená tvrdost HRC v Rockwellech podle normy ČSN EN 10109, stupnice tvrdosti C.



Obr. 10 Schéma oblastí návaru v příčném řezu

Cílem tohoto experimentu je zmapovat celé využitelné pole parametrů. Z hlediska navařování je důležité, aby tepelně ovlivněná oblast  $h$  byla co nejmenší a svařovací výkon co největší, to znamená maximální proud  $I$ . Převýšení  $p$  a závar  $z$  jsou důležité z hlediska promíchání původního materiálu s materiálem drátu. Pro zachování původních vlastností přídavného materiálu potřebujeme hodnotu zředění  $D_m$  co nejmenší. Tím se méně ovlivní materiál návaru a pevnostní a mechanické vlastnosti se budou méně odlišovat od odhadovaných. Menší zředění a tepelně ovlivněná oblast budou též znamenat menší pravděpodobnost výskytu mezikrystalických trhlin. Ale v některých případech je nutné použít vyšších výkonů, tím i elektrického proudu a pracovního napětí a tehdy se neubráníme vzniku větší tepelně ovlivněné oblasti a nežádoucích křehkých metalografických struktur v oblasti mezi tepelně ovlivněnou oblastí a spodními částmi závaru. Zvláště u svarů s nízkou hodnotou  $z$ ,  $t$ . Předpokládané metalografické struktury, které budou vznikat, jsou ledeburit a martenzit, které jsou málo odolné vůči rázovému namáhání. Rozkryv zplošťuje návar a má vliv na hodnotu převýšení  $p$ . Proto jsem zavedl průměrné hodnoty  $p'$ ,  $z'$ ,  $t'$ .

Jako výstupní hodnoty byly vypočteny poměry šířky housenky  $w$  na průměrném závaru, převýšení a tloušťce:  $\frac{w}{z}$ ,  $\frac{w}{p}$ ,  $\frac{w}{t}$ , což lépe demonstruje geometrické poměry návaru.

Při výpočtech byla dána přednost výpočtové hodnotě plochy návaru  $P_m$  před naměřenou  $P_n$ . Je to z důvodu, že při navařování dochází k částečnému smrštění a tím zvětšení objemu návaru a také tím, že nevíme jaký je přesný profil trubičky, tedy z kolika procent se skládá z drátu a z kolika je výplň. Známy jsou jenom vnější průměr, respektive poloměr svařovacího trubičkového drátu. Hodnota skutečné plochy návaru  $P_n$  je kontrolní, to znamená, že pokud se výrazně liší, signalizuje to chybu měření.



### 3.4.1 Zhodnocení výsledků, diskuze

#### 3.4.1.1 Posouzení geometrie návaru

Byly zpracovány grafy závislosti  $\frac{w}{z}$ ,  $\frac{w}{p}$ ,  $\frac{w}{h}$  na svařovacím proudu I.

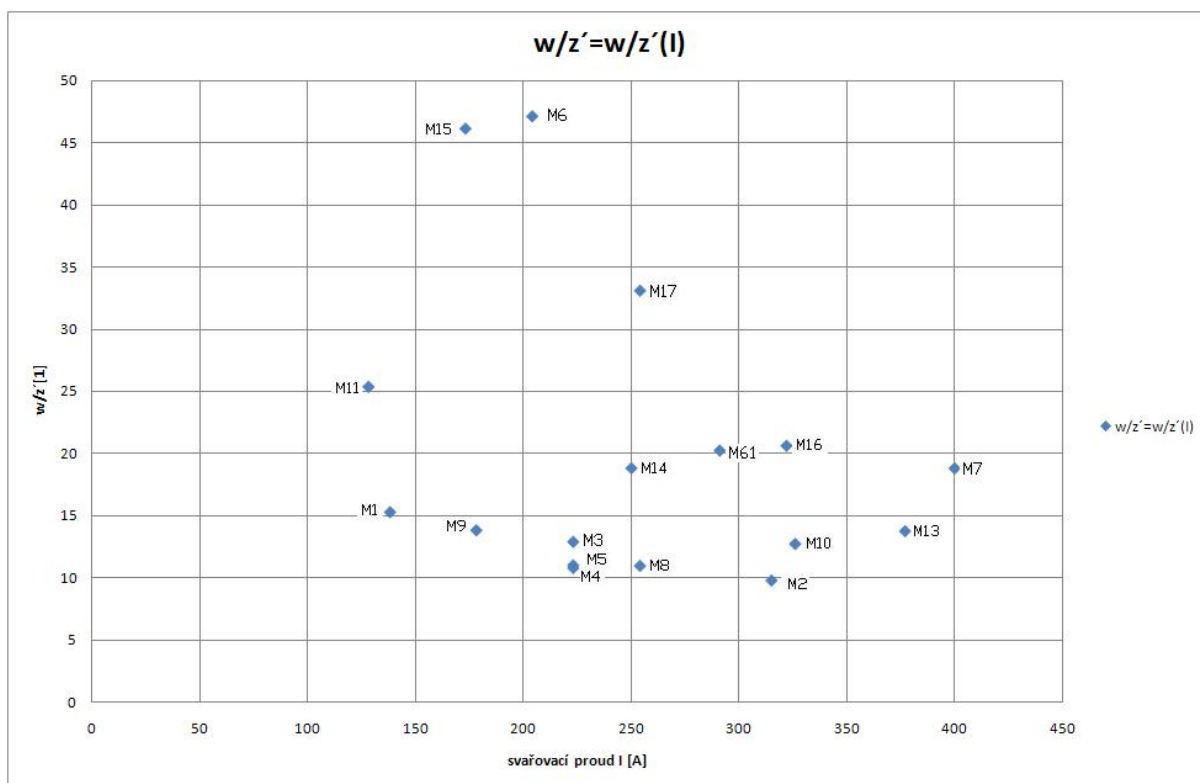
Budu hledat takové body v grafech, aby hodnoty  $\frac{w}{z}$ ,  $\frac{w}{t}$  byly co nejvyšší, a hodnota  $\frac{w}{p}$  co nejnižší, čímž zjistím, při jakém režimu vznikne nejširší návar a přitom je splněná podmínka minimálních hodnot  $z'$ ,  $h$  a maximální  $p'$ .

Tedy je žádoucí zjistit optimální interval svařovacího elektrického proudu, ve kterém je dosaženo poměrně velké šířky návaru za vzniku poměrně malé tepelně ovlivněné oblasti a poměrně malého závaru, což znamená menší zředění a z toho plynoucí co nejmenší ovlivnění původního materiálu desky.

Nízké zředění je nepochybně žádoucí z důvodu co nejnižšího ovlivnění původní litinové desky. Proto zjistím jaká je závislost zředění  $D_m$  na proudu I. Interval optimálního svařovacího proudu při optimálním rozkvyvu, který dostanu při porovnáním výše zmíněných veličin tj.  $\frac{w}{z}$ ,  $\frac{w}{p}$ ,  $\frac{w}{h}$  na proudu I, porovná se závislosti zředění  $D_m$  na napětí I.

Dále zjistím, při jakém rozkvyvu se toho dosáhne.

#### 3.4.1.2 Grafy a komentář ke geometrii návaru



Obr. 11 graf 1 funkční závislost  $f: w/z' = w/z'(I)$

Body, které mají vyšší hodnotu  $\frac{w}{z}$  odpovídají širším návarům. Kriterium maximální hodnoty  $\frac{w}{z}$ , vykazují návary M17, M6, M15, přičemž návary M17 a M6 byly navařovány s rozkyvem 20mm a M15 s rozkyvem 17mm, což odpovídá rozmezí proudů 170 až 250A. Na druhou stranu má výška těchto návarů p' nejnižší průměr ze všech vzorků.

Porovnám li návary z hlediska velikosti proudu, pak návary M13 a M7 jsou provedeny při nejvyšších hodnotách proudu a veličina  $\frac{w}{z}$  v rozmezí mezi 10 a 20, což odpovídá průměru rozložení hodnot v grafu 1. Je nutno podotknout, že pro návar M13 byl použit rozkyv 10mm a pro návar M7 20mm. Z hlediska závislosti šířky návaru na závaru se mnoho od sebe neliší, i když rozkyv byl 2 krát větší.

Návary navařené nejnižšími proudy jsou M1 a M11. Je zajímavé, že návar M11 má poměrně velkou hodnotu  $\frac{w}{z}$ , pravděpodobně způsobeno vyšším rozkyvem 10mm, a návar

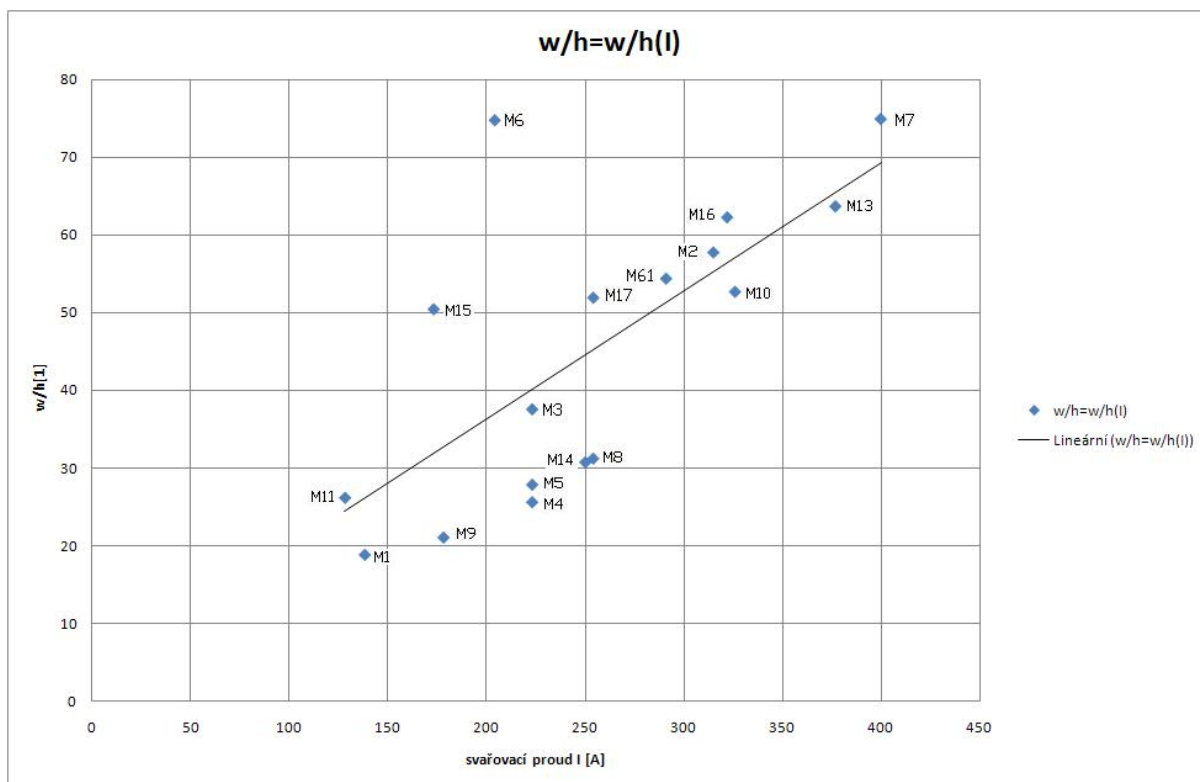
M1 má hodnotu  $\frac{w}{z}$  kolem 15 jednotek. Uvážím li, že bez ohledu na použitý rozkyv, většina návarů se nachází v rozmezí hodnot  $\frac{w}{z} \in \langle 10; 20 \rangle$ , tak návar M1 nevybočuje z řady.

Z předchozích úvah plyne, že za snahy vytvořit při navařování co nejširší návar a zároveň co nejmenší závar, tak primární význam bude mít použitý rozkyv. Velikost požitého proudu bude mít druhotný význam. A také celková mohutnost návaru t nebude mít zásadní vliv. Interval hodnot velikosti proudu pro maximální šířku návaru a zároveň co nejmenší závar při použití vyšších rozkyvů bude přibližně od 170A do 260A.

Další důležité hledisko návarů je posouzení tepelně ovlivněné oblasti. Protože pro co nejširší návar s co nejmenším závarem nepotřebuji použít svařovací proudy s hodnotami nad 350A, tak tepelně ovlivněné oblasti těchto návarů nebudou jedny z největších. Z toho důvodu se mi minimalizují nepříznivé vlivy, které pocházejí právě ze samotné existence tepelně ovlivněné zóny.

Následující graf 2 ukazuje závislost  $\frac{w}{h}$  na svařovacím proudu I, jednotky jsou podle tabulky 1. Užívám funkční závislost  $f: \frac{w}{h} = \frac{w}{h}(I)$ . Veličina  $\frac{w}{h}$  zohledňuje snahu dosáhnout co největší šířky návaru a co nejmenší tepelně ovlivněné zóny. Tedy šířka návaru je přímo úměrná velikosti svařovacího proudu a výška tepelně ovlivněné zóny je nepřímo úměrná velikosti svařovacího proudu.

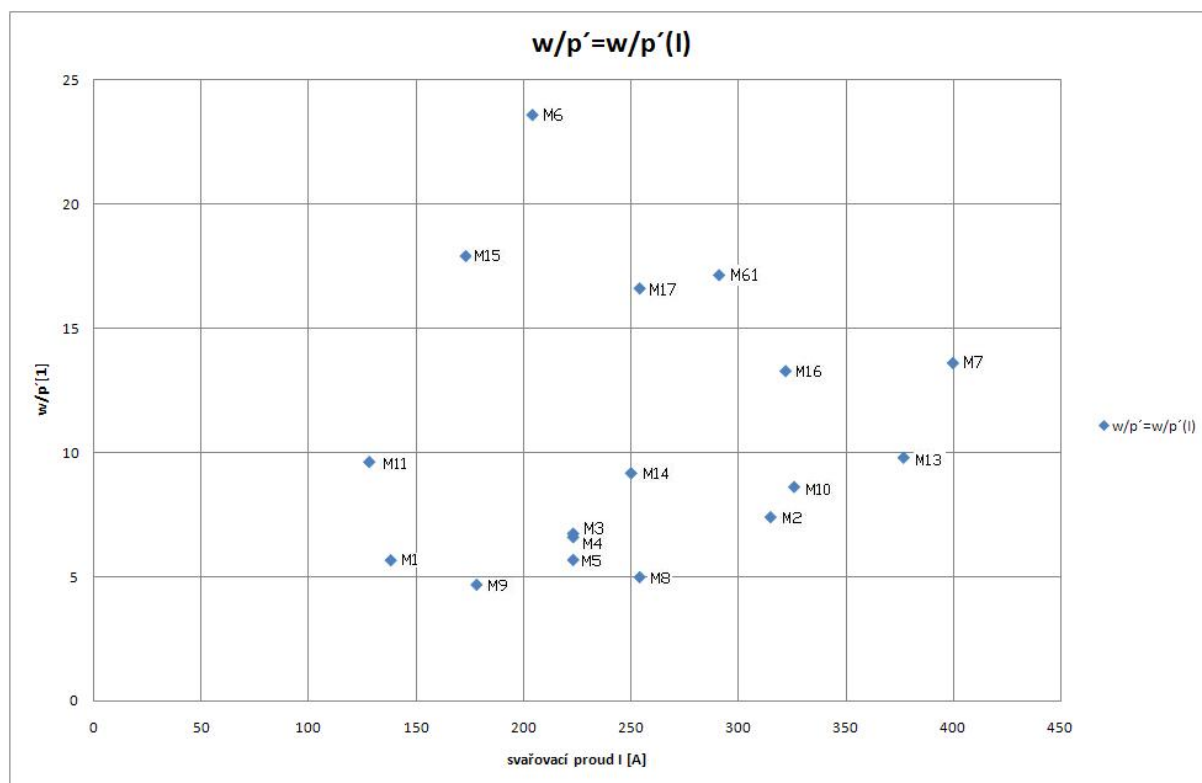




Obr. 12 graf 2 funkční závislost  $f: w/h = w/h(I)$

Nebereme-li v úvahu různé použité rozkvyvy, je zde patrná lineární závislost, takže můžeme proložit body křivkou lineární regrese. To znamená, že se zvyšujícím se proudem svařování, se zvyšuje veličina  $\frac{w}{h}$ , to znamená, že se zvyšuje relativní poměr šířky návaru k šířce tepelně ovlivněné oblasti. Z rozložení bodů na grafu lze vysledovat další závěr. V rozmezí hodnot velikosti svařovacího proudu přibližně od 170A do 250A, to rozmezí, které jsem určil jako optimální z hlediska veličiny  $\frac{w}{z'}$ , lze pozorovat shluk bodů s hodnotami od 20 do 40 jednotek  $\frac{w}{h}$ . Tyto návary byly navařeny při rozkvyvu 0, 3 a 10 mm, přičemž většina z nich při nulovém rozkvyvu. Další návary v tomto intervalu proudu odpovídají rozkvyvům 17mm a 20mm a jejich hodnoty  $\frac{w}{h}$  dvou z nich jsou o 10 jednotek větší a nejvýrazněji vyčnívá návar M6 s jednou z nejvyšších hodnot  $\frac{w}{h}$  vůbec z grafu. Další shluk bodů je v rozmezí svařovacího proudu od 290A až 380A, kde se hodnota parametru  $\frac{w}{h}$  pohybuje mezi 50 až 65 jednotek. Největší hodnotu  $\frac{w}{h}$  má návar M7. Z toho plyne, že k dosažení co největší šířky návaru v poměru s nejmenší tepelně ovlivněnou oblastí je potřeba buď co největšího rozkvyvu při svařování elektrickým proudem v rozmezí 170A až 250A nebo použití vyšších svařovacích proudů mezi 300 až 380A a nižších rozkvyvů.

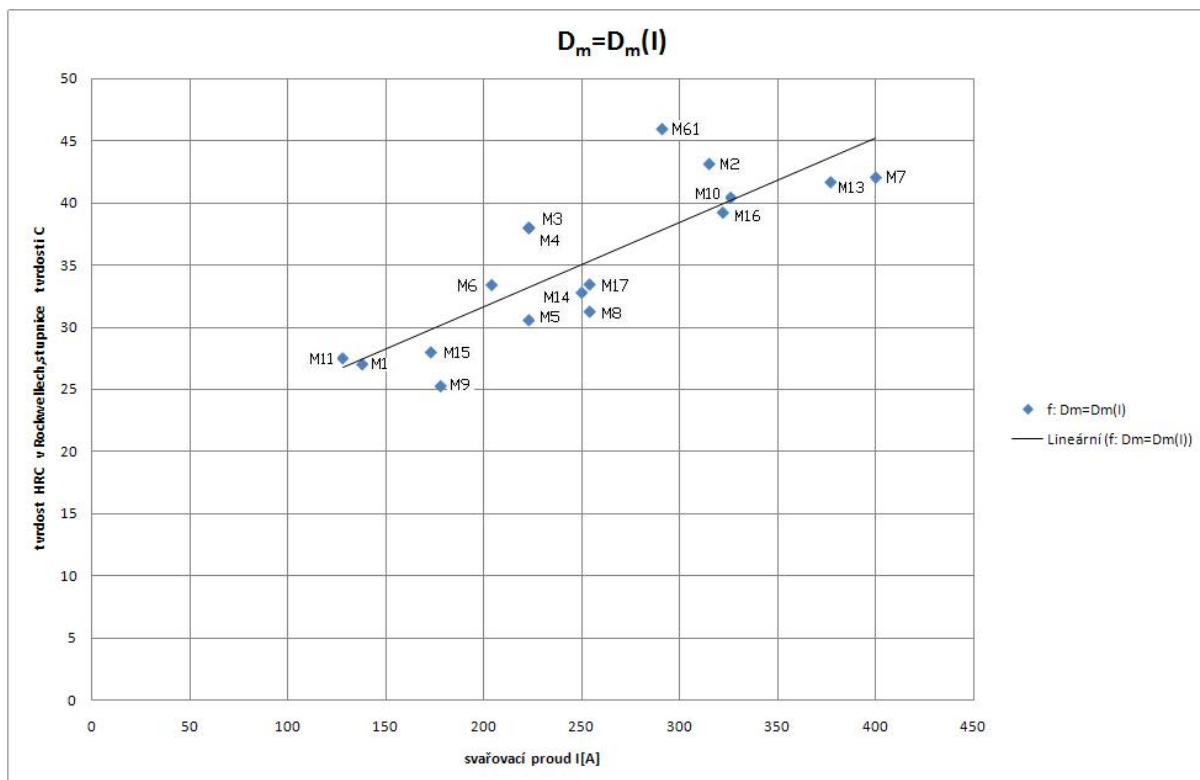
Následující graf 3 znázorňuje funkční závislost  $f: \frac{w}{p'} = \frac{w}{p'}(I)$ , tedy  $\frac{w}{p'}$  v závislosti na svařovacím proudu. Jednotky I a  $\frac{w}{p'}$  jsou podle tabulky 1.



Obr. 13 graf 3 závislosti  $f: w/p' = w/p'(I)$

Je patrné, že svar M6 opět vyčnívá a má největší hodnotu  $\frac{w}{p'}$  v intervalu proudu od 170 do 300A. to znamená malé převýšení p a větší šířka w svaru. Jinak při použití vyšších rozkryvů a vyššího svařovacího proudu dosahujeme hodnoty  $\frac{w}{p'}$  přibližně mezi 10 a 15 jednotkami.

Z hlediska vlastnosti návarů významnější bude zředění  $D_m$ . Následující graf 4 ukazuje funkční závislost  $f: D_m = D_m(I)$ , tedy zředění jako funkci proudu. Graf ukazuje, jak se mění zředění se zvyšujícím se svařovacím výkonem. Jednotky I a  $D_m$  jsou podle tabulky 1.



Obr. 14 graf 4 funkční závislost  $D_m = D_m(I)$

Proložil jsem křivku lineární regrese skrz body v grafu 4 a je vidět, že lze sledovat určitou lineární závislost mezi zředěním a svařovacím proudem. Se zvyšujícím se proudem, který je přímo úměrný zvyšujícímu se tavnému výkonu, se zvyšuje i zředění  $D_m$  bez ohledu na použitý rozkvyv. Je vidět, že například návar M6, navařený rozkvyvem 20mm vykazuje zředění mezi 30 a 35% a zároveň návary M61 a M7 se stejným rozkvyvem mají zředění větší než 40%. Z grafu je patrné, že interval svařovacího proudu přibližně mezi 170 až 250A, který jsme určili z hlediska optimálního poměru  $w/z'$  odpovídá doporučenému zředění 25 – 35 %. Vyšší svařovací proud bude znamenat větší zředění  $D_m$  až 40 - 45% .

### 3.4.1.3 Grafy a komentáře ke kvalitě návaru

Produktivita navařování je závislá na velikosti tavného výkonu, tedy na svařovacím proudu. Ale, jak plyne z předchozích závislostí, se zvyšujícím se proudem se zvětšuje zředění a tepelně ovlivněná zóna. Proto je nutné posoudit produktivitu ve vztahu k dosažené kvalitě návaru. Pro dosažení vyhovující kvality návaru, tedy, aby zředění bylo v rozsahu mezi 25 a 35%, bude svařovací proud v rozsahu mezi 170 a 250A. Tím se dosáhne největší produktivity a nejlepší kvality návaru.

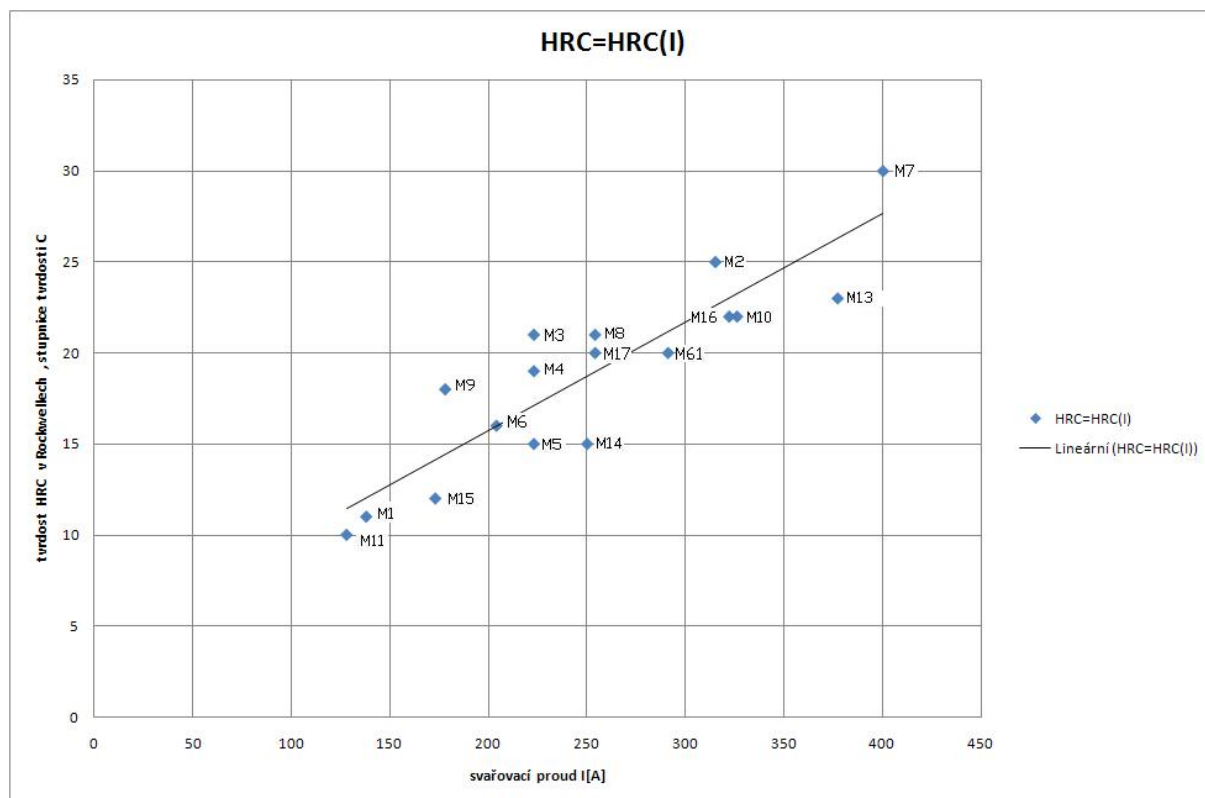
### 3.5 Měření tvrdosti návarů

Pro posuzování kvality návaru je důležité zjistit, jaká je tvrdost navařené vrstvy, v našem případě první vrstvy návaru. V tabulce 1 jsou znázorněny naměřené hodnoty tvrdosti HRC v Rockwellech podle normy ČSN EN 10109, stupnice tvrdosti C, následující tabulka 2 ukazuje použité zatěžovací síly a jaké vnikací tělísko bylo použito.

Tabulka 2 Přehled hodnot pro zkoušku tvrdosti podle Rockwella HRC, stupnice C

Stupnice tvrdosti	Symbol tvrdosti	Vnikací tělísko	Předběžné zatížení $F_0$ [N]	Přídavné zatížení $F_1$ [N]	Celkové zatížení $F$ [N]
C	HRC	Diamantový kužel	98,07	1373	1471

Zjistíme závislost tvrdosti HRC návaru na svařovacím proudu I.



Obr. 15 Graf 5 funkční závislost f: HRC=HRC(I)

Z grafu je vidět, že se zvyšujícím se svařovacím proudem se zvyšuje i tvrdost návaru. Opět byla provedena lineární regrese, bez ohledu na použitý rozkryv. Je patrné, že se svařovacím proudem se zvyšuje tvrdost. V intervalu mezi 170 až 300A se tvrdost pohybuje mezi 15 a 20HRC. Při použití svařovacích proudů mezi 300 a 380A se tvrdost návarů pohybuje mezi 20 a 25HRC. Nejvyšší tvrdost je u proudu kolem 400A - svar M7 - 30HRC. To znamená, že čím je vyšší tavný výkon, tím více základního materiálu bude ovlivňovat složení tavné lázně. Otázku zvýšení tvrdosti návaru s rostoucím promíšením nám zodpoví teprve průzkum mikrostruktury návaru.

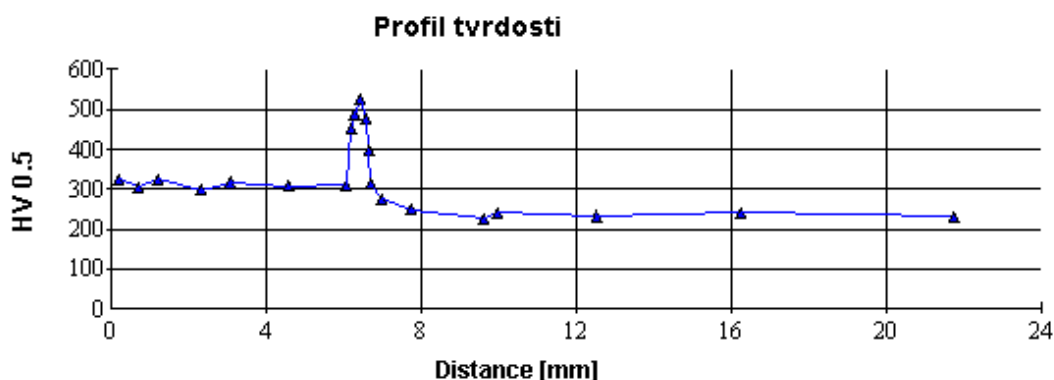
### 3.5.1 Měření mikrotvrdosti a metalografické struktury v tepelně ovlivněné oblasti

Provedl jsem průzkum tepelně ovlivněné zóny z hlediska tvrdosti. Zkoumal jsem, jaké metalografické struktury se tam objevují. Tvrdost jsem měřil postupně od povrchu návaru směrem k litině. Dá se předpokládat, že v tepelně ovlivněné zóně bude tvrdost největší. Zkouška tvrdosti byla provedena podle normy ČSN EN ISO 6507-2 HV 0,5, pro měření mikrotvrdosti za působení nízkých sil podle Vickerse. Následující grafy udávají, jak se mění tvrdost v závislosti na tom, v jaké metalografické struktuře měřím tvrdost.

**Tabulka 3 - Návar vzorek č. 7**

	Dist[μm]	HV 0,5	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	196,9	326,1	53,8	52,8	53,3
2	715,7	305,7	54,5	55,7	55,1
3	1222,7	326,1	53,0	53,6	53,3
4	2331,9	299,0	55,3	56,1	55,7
5	3084,3	316,4	53,8	54,5	54,1
6	4576,4	308,1	55,1	54,7	54,9
7	6058,4	310,6	55,5	53,8	54,6
8	6204,1	451,9	46,0	44,6	45,3
9	6284,1	484,3	42,7	44,8	43,8
10	6417,8	527,9	41,5	42,3	41,9
11	6565,2	475,4	44,2	44,2	44,2
12	6643,2	399,7	50,7	45,6	48,2
13	6705,2	312,9	55,5	53,4	54,4
14	6981,5	276,1	57,5	58,4	58,0
15	7727,5	248,2	60,2	62,0	61,1
16	9616,5	225,7	64,5	63,7	64,1
17	9954,1	241,6	61,6	62,3	61,9
18	12523,1	233,1	62,0	64,1	63,1
19	16222,1	241,6	62,0	61,9	62,0
20	21715,3	231,6	63,5	63,1	63,3

Minimum: 225,7                      Maximum: 527,9  
Průměr: 327,1                      Medián: 309,3  
StDev: 92,270



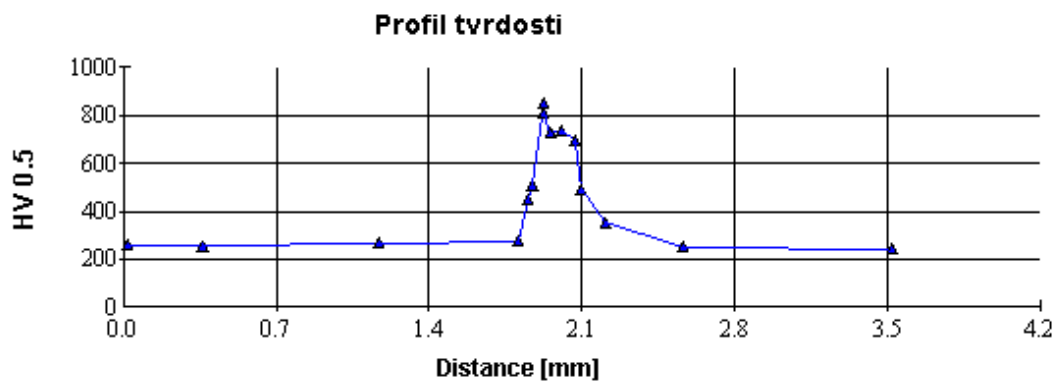
Obr. 16 Graf 6 funkční závislost  $f:HV\ 0,5=HV\ 0,5(d)$  pro návar č.7  
kde HV 0,5 je mikrotvrdost a d je distance- měření probíhalo  
od povrchu návaru směrem k litině

Metoda: Vickers  
Objektiv: 40x  
Zatížení: HV 0,5  
Doba zatížení: 20,000

Tabulka 4 - návar na litině – vzorek č.6

	Dist[μm]	HV 0,5	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	18,1	264,0	57,5	61,0	59,3
2	18,9	260,3	59,6	59,8	59,7
3	362,1	255,1	59,8	60,8	60,3
4	1171,1	267,6	58,1	59,6	58,9
5	1807,5	275,2	56,7	59,4	58,0
6	1853,1	452,0	46,0	44,6	45,3
7	1872,6	510,0	42,5	42,7	42,6
8	1922,7	852,1	34,3	31,6	33,0
9	1924,7	810,5	33,1	34,5	33,8
10	1955,1	725,8	35,7	35,7	35,7
11	2006,5	738,2	36,0	34,9	35,4
12	2067,5	693,1	36,2	37,0	36,6
13	2095,9	493,8	43,5	43,1	43,3
14	2207,3	354,1	50,4	52,0	51,2
15	2561,5	251,5	59,8	61,6	60,7
16	3521,7	243,3	59,8	63,7	61,7

Minimum: 243,3      Maximum: 852,1  
Průměr: 465,4      Medián: 403,0  
StDev: 227,341



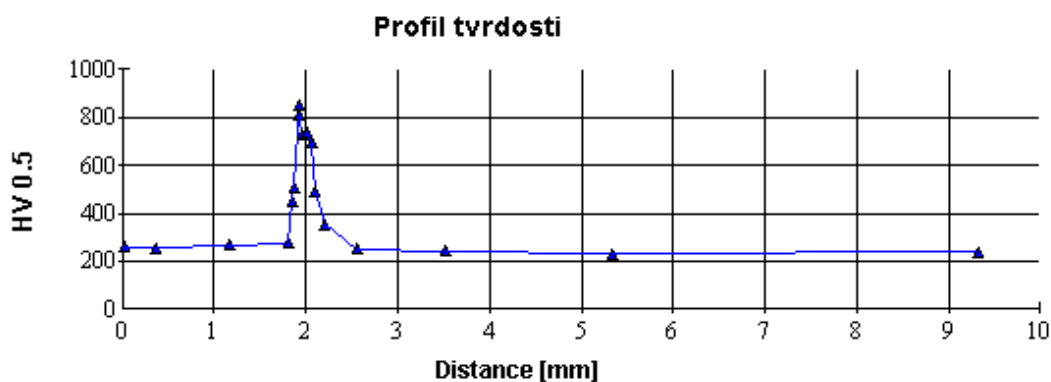
Obr. 17 graf 7 funkční závislost  $f: HV_{0,5} = HV_{0,5}(d)$  pro návar č.6  
kde HV 0,5 je mikrotvrdost a d je distance- měření probíhalo  
od povrchu návaru směrem k litině

**Metoda:** Vickers  
**Objektiv:** 40x  
**Zatížení:** HV 0,5  
**Doba zatížení:** 20,000

Tabulka 5 návar na litině - č.6

	Dist[μm]	HV 0,5	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	18,1	264,0	57,5	61,0	59,3
2	18,9	260,3	59,6	59,8	59,7
3	362,1	255,1	59,8	60,8	60,3
4	1171,1	267,6	58,1	59,6	58,9
5	1807,5	275,2	56,7	59,4	58,0
6	1853,1	452,0	46,0	44,6	45,3
7	1872,6	510,0	42,5	42,7	42,6
8	1922,7	852,1	34,3	31,6	33,0
9	1924,7	810,5	33,1	34,5	33,8
10	1955,1	725,8	35,7	35,7	35,7
11	2006,5	738,2	36,0	34,9	35,4
12	2067,5	693,1	36,2	37,0	36,6
13	2095,9	493,8	43,5	43,1	43,3
14	2207,3	354,1	50,4	52,0	51,2
15	2561,5	251,5	59,8	61,6	60,7
16	3521,7	243,3	59,8	63,7	61,7
17	5340,5	229,9	62,5	64,5	63,5
18	9321,0	239,1	61,5	63,1	62,3

**Minimum:** 229,9      **Maximum:** 852,1  
**Průměr:** 439,8      **Medián:** 314,7  
**StDev:** 226,232



Obr. 18 graf 8 funkční závislost  $f:HV\ 0,5=HV\ 0,5(d)$  pro návar č.6  
 kde HV 0,5 je mikrotvrdost a d je distance-měření probíhalo  
 od povrchu návaru směrem k litně

Měřil jsem metalografický výbrus z návaru č.7 a č.6.V případě návaru č.7 prvních 7 vpichů je v oblasti návaru. Mikrotvrdost se tam nachází kolem 300 HV 0,5. Dále se hodnota tvrdosti dalších vpichů začíná zvyšovat tím, jak se dostávám do tepelně ovlivněné zóny. Největší hodnoty mikrotvrdosti se nachází v tepelně ovlivněné oblasti a maximum je přibližně

v 528 HV 0,5. Dále tím, jak se dostávám k litině mikrotvrдость klesá. V litině se mikrotvrдость pohybuje od 230 do 250 HV.

V případě návaru č.6 se mikrotvrдость v návaru pohybuje od 260 do 275 HV 0,5. Tím, jak se dostávám do tepelně ovlivněné oblasti, tvrdost roste a maxima dosahuje v 852 HV 0,5. Pak postupně tvrdost klesá směrem k litině. Naměřená mikrotvrдость litiny na tomto vzorku se pohybuje přibližně od 230 do 250HV 0,5, což odpovídá intervalu naměřených mikrotvrđostí jako na předchozím vzorku č.7.

Bude mě zajímat, jaké jsou vzniklé metalografické struktury, které dotyčnou tvrdost v jednotlivých místech způsobují. Následující přehled znázorňuje jaký je interval mikrotvrđostí pro různé metalografické struktury.

#### *Strukturní složka mikrotvrđost [HV]*

Ferit 85

Ferit 85 – 130

Austenit 120 – 180 /800 – zpevněný/

Perlit hrubý 200 – 250

Perlit jemný 250 – 300

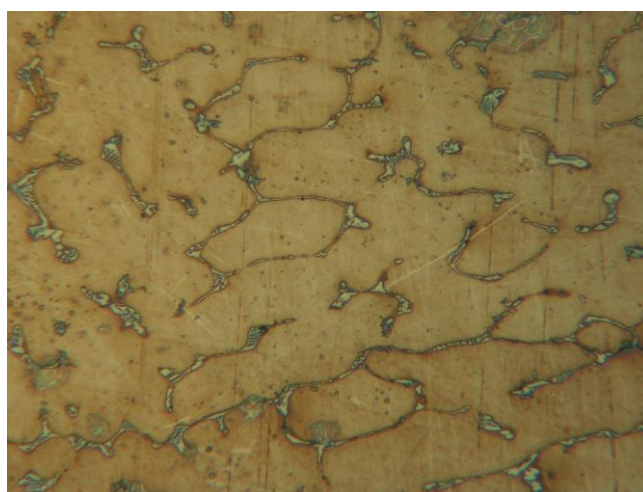
Bainit horní 300 – 400

Bainit dolní 400 – 550

Martenzit nízkouhlíkový 600 – 700

Martenzit vysokouhlíkový 700 – 850

Následující fotografie znázorňují jaká je metalografická struktura pro vzorek návaru č.7.

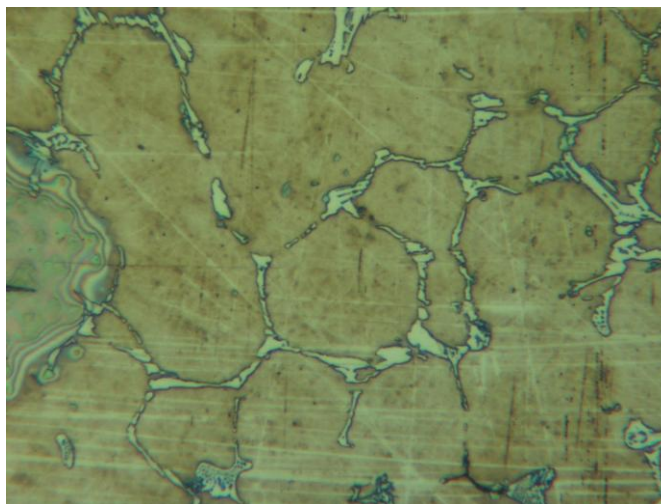


Zvětšení

500x

Obr. 19 struktura v návaru č.7





Zvětšení

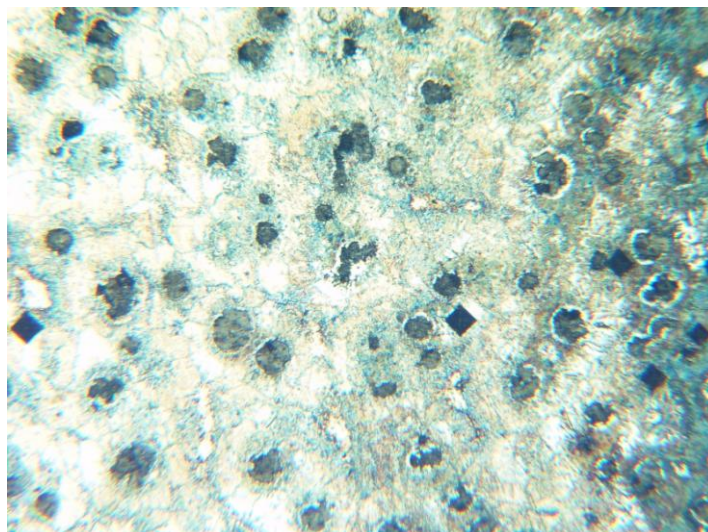
1000x

Obr. 20 - struktura v návaru č.7

Z obrázků 19 a 20 lze jasně rozeznat hranici austenitických zrn, po které se vylučuje steadit, který je velmi křehký. Patrně v litině bylo obsaženo nejméně 0,8% fosforu, který se pak rozpustil v návaru.

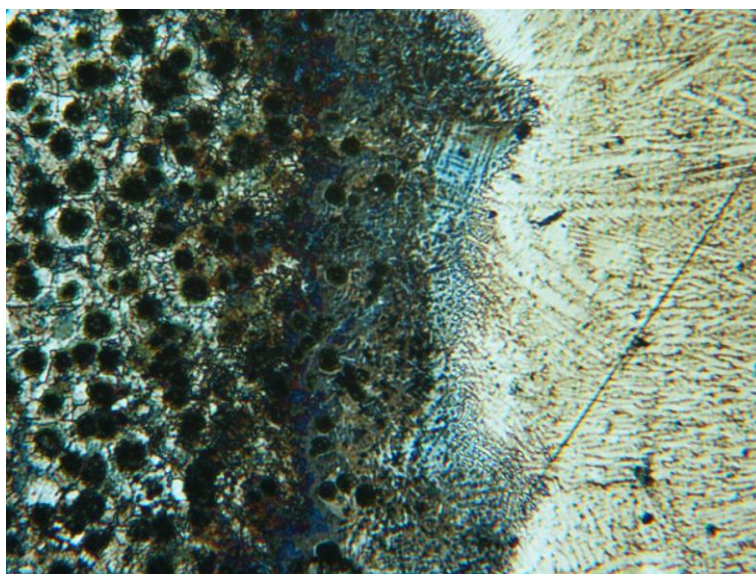
### 3.5.2 Tepelně ovlivněná oblast

V další fázi zkoumání mikrostruktury jsme se zaměřili na tepelně ovlivněné oblasti. Na obrázku 21 je znázorněna litina a tepelně ovlivněná oblast vzorku č.7.



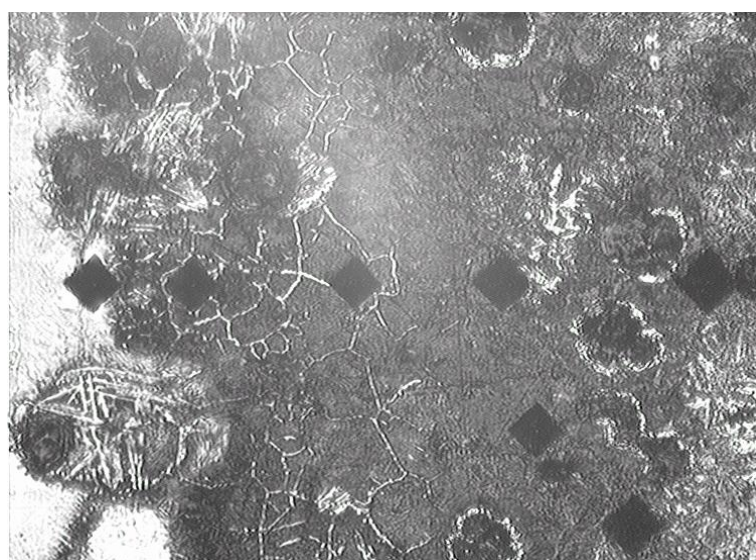
Obr. 21 - litina vzorek č.7

Litina je podeutektoidní s tvarem grafitu ve formě kuliček (složení uhlíku od 3 do 4%). Grafitový eutektoid této litiny podle stabilního diagramu Fe-C je tvořen směsí feritu a sekundárního grafitu. Je zřetelně vidět, jak jsou kuličky grafitu obaleny feritem. V pravé části fotografie je vidět přechod k tepelně ovlivněné oblasti. Na další fotografii je vidět tepelně ovlivněná oblast návaru č.7.



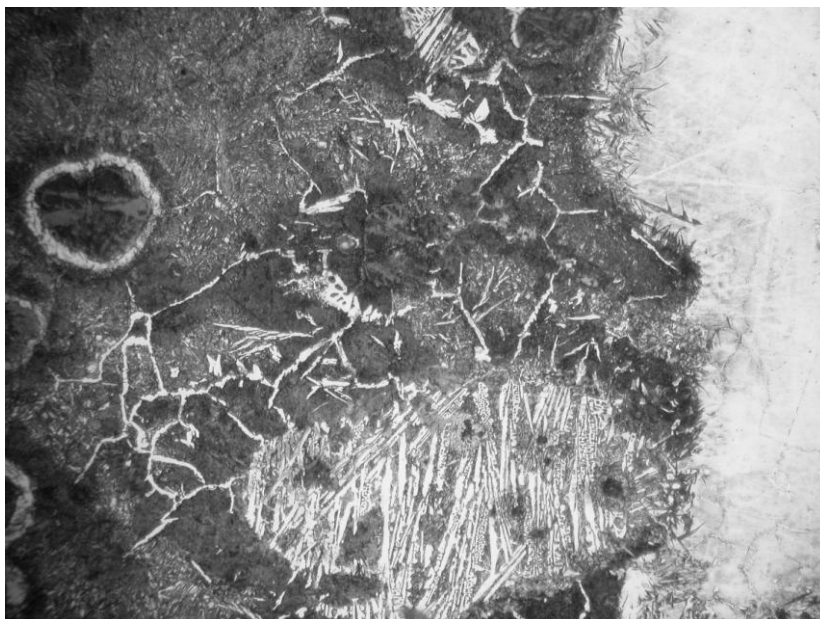
Obr. 22 Tepelně ovlivněná oblast, vzorek č.7

Na obrázku 22 je vidět kuličky grafitu. V tepelně ovlivněné oblasti jsou vidět různě rozpuštěné kuličky grafitu litiny, která byla silně tepelně ovlivněná svařovacím obloukem.



Obr. 23 - tepelně ovlivněná oblast vzorek č.7 – větší zvětšení  
Jsou tam vidět vpichy od špičky jehlanu při měření mikrotvrdosti  
Tvrдость byla převážně měřená v martenzitu – tmavší části



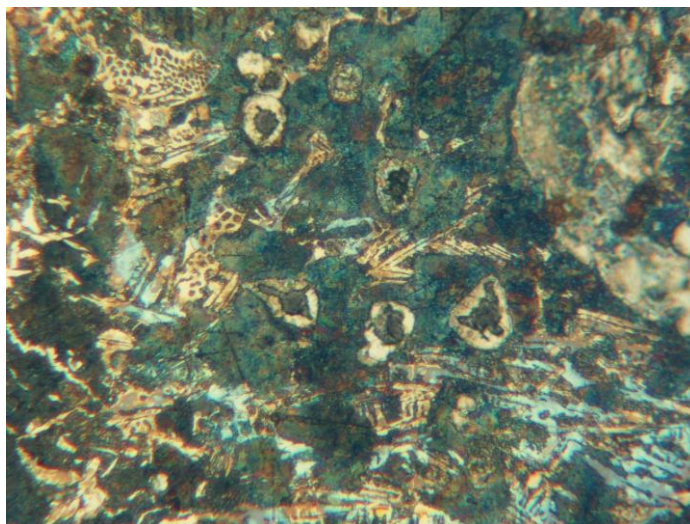


Obr. 24 - tepelně ovlivněná oblast vzorek návaru č.7 – větší detaily ve struktuře

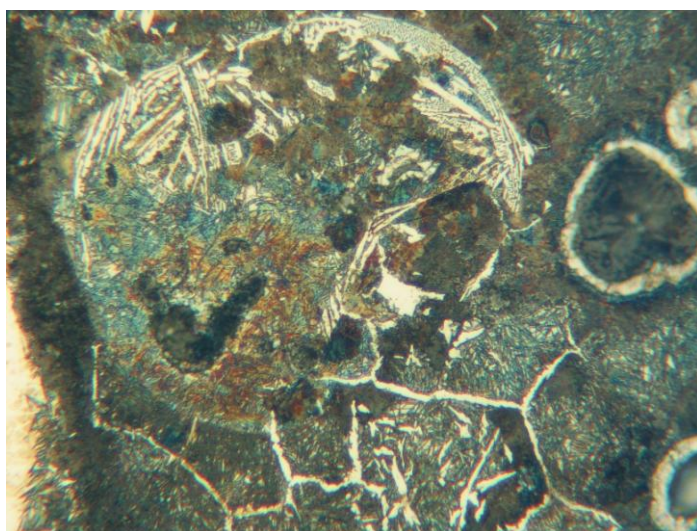


Obr. 25 - tepelně ovlivněná oblast vzorek č.7  
detaily ve struktuře  
na přechodu návar – tepelně ovlivněná oblast

Na obrázku 25 jsou jasně zřetelně vidět jehlice martenzitu, z nichž některé zasahují i do návaru. V oválném útvaru lze kromě martenzitu rozlišit i ledeburit- světlé jehlice. Těsně u přechodu s návarem je v oválu patrná nerozpuštěná kulička grafitu, kolem které je tmavší hmota-zřejmě martenzit, k jehož vzniku přispěla právě globule grafitu, která nauhličila své lokální okolí.

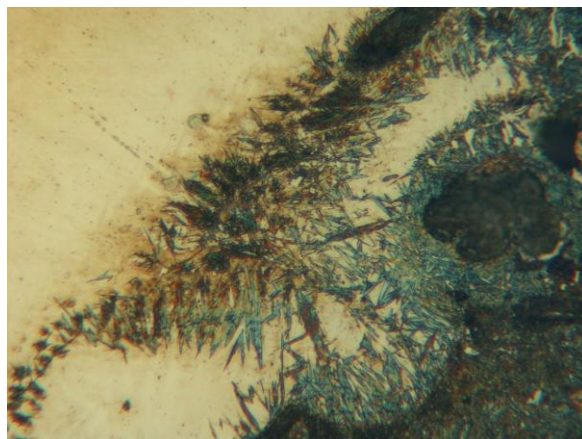


Obr. 26 – tepelně ovlivněná oblast- jsou v ní vidět skoro rozpuštěné kuličky grafitu, tmavě modrá barva odpovídá martenzitu, nažloutlá část je ledeburit



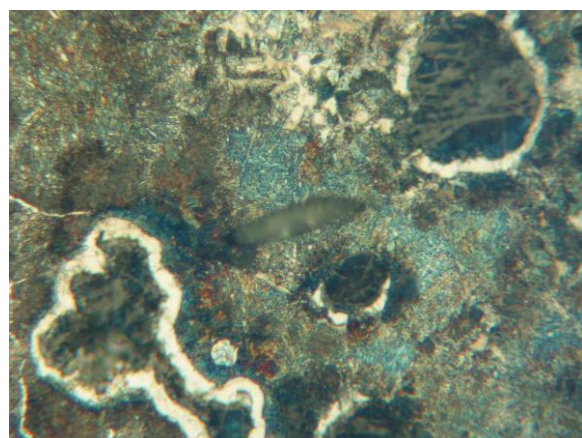
Obr. 27 - tepelně ovlivněná oblast vzorek č.7 - bizarní obrazce metalografických struktur-jehlice martenzitu, světlé jehlice jsou ledeburit, v pravé části kulička grafitu obalena feritem, těsně nad ní skoro rozpuštěná kulička grafitu





Obr. 28 - tepelně ovlivněná oblast vzorek č.7  
 detaily ve struktuře  
 na přechodu návar – tepelně ovlivněná oblast

Na obrázku 28 lze jasně rozlišit jehlice martenzitu – jsou namodralé, které zasahují do návaru a nacházejí se kolem grafitové kuličky, protože zvýšená koncentrace uhlíku přispívá ke vzniku martenzitu



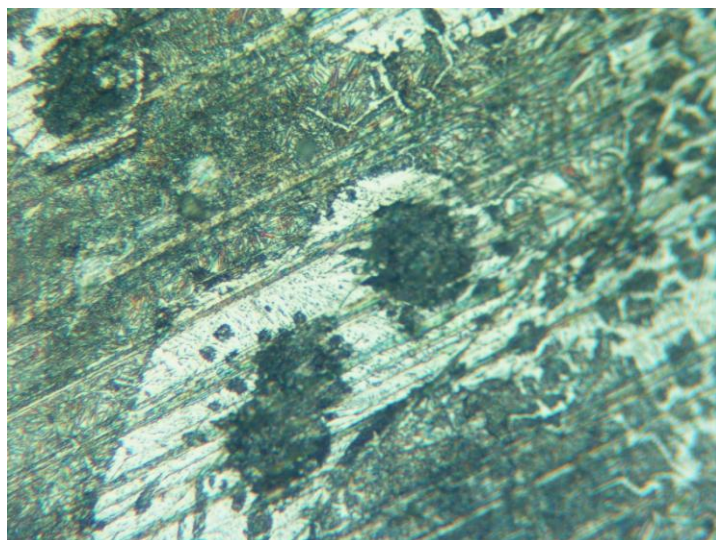
Obr. 29 tepelně ovlivněná oblast – tmavě modrá odpovídá martenzitu  
 a jsou zřetelné kuličky grafitu o různé velikosti, kolem kterých je ferit

Na základě obr. 29 se lze domnívat to, že, když je litina vystavena teplu oblouku, se kuličky grafitu rozpouští. Co vzniká tepelným ovlivněním litiny, vysvětluje stabilní diagram Fe-C. Tím, že se litina zahřívá ze svarové lázně nad eutektoidní teplotu, její složení bude odpovídat grafitickému eutektiku pro podeutektickou litinu a to se skládá z austenitu a primárního grafitu – to těsně u tepelně ovlivněné zóny. Na fotografiích je vidět tepelně ovlivněnou zónu. Tam budou vznikat i další metalografické struktury. Zvláště z fotografie obr. 27 s většími detaily jsou vidět jemné jehlice, které patří martenzitu – tmavě modré, jehlice ledeburitu - světlé, mezi kterými je pravděpodobně ledeburit.

Takže můžu konstatovat, že v tepelně ovlivněné oblasti vzorku č.7 se vyskytuje martenzit, rozpadlý ledeburit, místy zbytkový austenit, sem tam různě rozpuštěné kuličky grafitu a ferit. Tvrdost tepelně ovlivněné zóny je daná převážně daná tvrdostí ledeburitu a martenzitu.

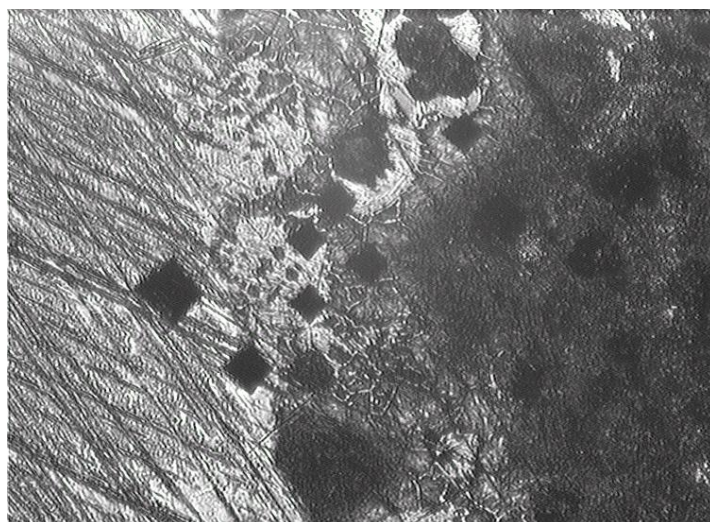
U vzorku č.6, v jehož tepelně ovlivněné oblasti se nacházely největší hodnoty tvrdosti, je tvrdost daná spíše přítomností vysokouhlíkového martenzitu.

Martenzit je metastabilní roztok uhlíku v  $Fe_\alpha$ . Martenzit vzniká bezdifuzní přeměnou austenitu při ochlazování pod teplotu martenzit start  $M_s$ . Uhlík zůstává rozpuštěn ve vznikajícím martenzitu a deformuje tetragonálně jeho mřížku. Tím je dána jeho vysoká tvrdost. Proto v tepelně ovlivněné zóně byly naměřeny největší hodnoty tvrdosti.



Obr. 30 tepelně ovlivněná oblast vzorek č.6

Na obr. 30 lze zřetelně rozlišit jehlice, které mohou náležet martenzitu. Kolem globulí grafitu je ledeburitický obal. Lze zpozorovat, jak některé kuličky grafitu se začaly rozpouštět.

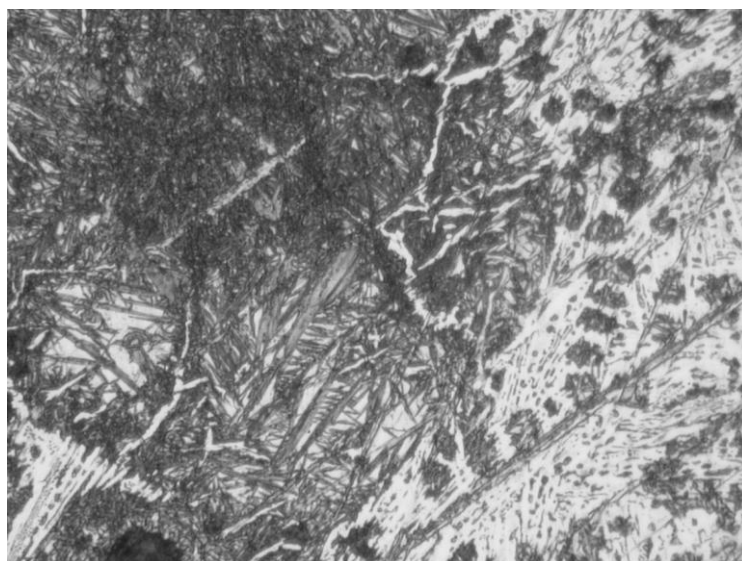


Obr. 31 tepelně ovlivněná oblast vzorku č.6 nalevo návar, napravo litina

Na obrázku 31 je zřetelně vidět, kde byla měřená mikrotvrdost. V oblasti návaru jsou otisky největší, protože je patrně nejměkčí. Otisky v tepelně ovlivněné zóně jsou menší díky výskytu tvrdých struktur martenzitu a ledeburitu.



Obr. 32 tepelně ovlivněná oblast - vzorek č.6  
přechod mezi tepelně ovlivněnou oblastí a návarem



Obr. 33 tepelně ovlivněná oblast - vzorek č.6 tepelně ovlivněná oblast  
přechod mezi tepelně ovlivněnou oblastí a návarem, větší detail

Z posledních fotografií obrázků 32 a č.33 je vidět přítomnost martenzitických jehlic a zbytky zcela nerozpuštěných kuliček grafitu nahličili zřejmě tavnou lázeň ve svém okolí a přispěly tak ke vzniku ledeburitu – světlé části. Ve struktuře litiny jsou opět vidět kuličky grafitu, které se začaly rozpouštět.

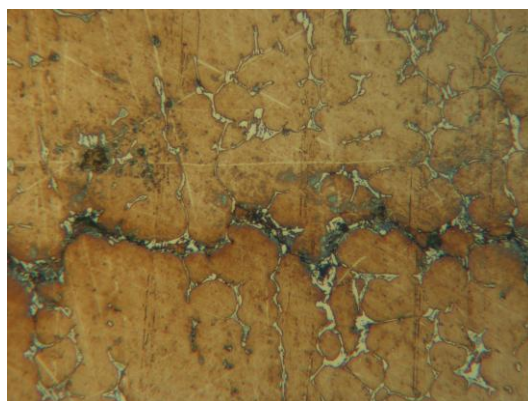
Takže obecně při navařování na litinu s globulárním grafitem se v tepelně ovlivněné zóně vyskytují metalografické struktury jako martenzit, ledeburit, může tam být zbytkový



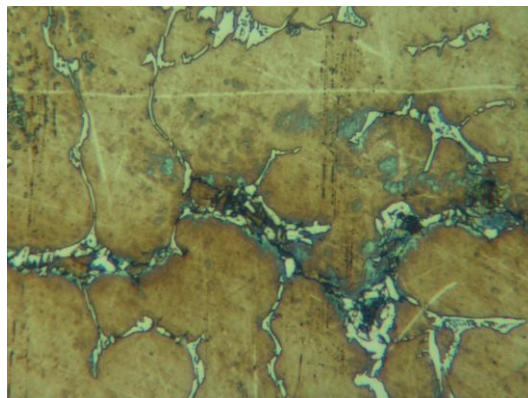
austenit v minimálním množství a vyskytují se různě rozpuštěné kuličky grafitu, kolem nichž je ferit.

### 3.6 Vznik trhlin

Trhliny u návarů vznikají díky velkému vnitřnímu pnutí. Mohou také být způsobeny expanzí bublin plyných oxidů nebo nežádoucích absorbovaných plynů obsažených v základním materiálu nebo plynů vznikajících při navařování. Po ztuhnutí svarové lázně zůstanou ve struktuře. Studium trhlin v návaru nám řekne víc.

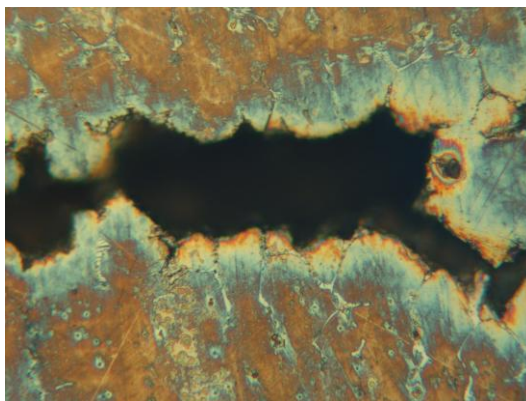


Obr. 34 Struktura návaru lze pozorovat šířící se trhlínu, která vede po hranicích zrn austenitu, kde je steatit, vzorek č.7



Obr. 35 Struktura návaru, detail trhlíny- modrá vlákna jsou steatit, nažloutlá barva je austenitický návar, vzorek č.7





Obr. 36 Struktura návaru s detailem trhliny (modrá barva odpovídá steatitu, zbytek je návar)

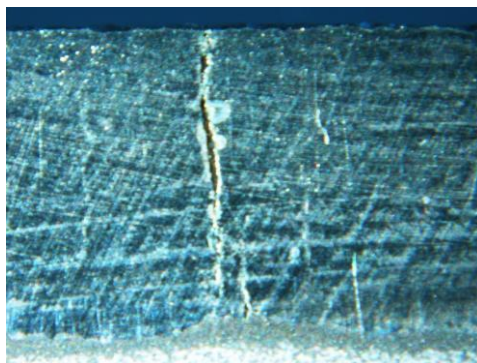
Z obrázků 34 a 35 je vidět, že se trhlina v návaru šíří tam, kde je steadit, to znamená po hranicích austenitických zrn. Z toho plyne, že trhlina je mezikrystalická. Její šíření probíhá po hranicích zrn, protože je tam křehčí metalografická struktura- steadit. Při chladnutí svarové lázně vznikají velká vnitřní pnutí, která se projeví vznikem trhlín. Nejdřív budou tedy narušeny křehčí struktury, a proto právě se trhliny šíří po hranicích zrn, kde je steadit.



Obr. 37 – metalografický výbrus návar č.10 – trhlina se šíří z tepelně ovlivněné oblasti



Obr. 38 – metalografický výbrus návar č.5 – menší trhlina se šíří z tepelně ovlivněné oblasti



Obr. 39 návar č.7 je vidět jak se trhliny šíří z tepelně ovlivněné oblasti až k povrchu



Obr. 40 metalografický výbrus návar č.6- červeně zakroužkované jsou trhliny

Na obrázků 39 jsou vidět trhliny v návarech. Některé z nich se šíří od tepelně ovlivněné oblasti. Na obrázku 40 jsou červeně zakroužkovány trhliny vedoucí od povrchu. Oba návary mají menší převýšení, ale zároveň byly použité co největší rozkvy. Ale na druhou stranu u návaru č.5 – obr.38, který má větší převýšení není tolik trhlín. Z toho plyne, že pokud je převýšení návaru malé, i když se použije větší rozkvy, bude vznikat více trhlín.

#### 4. Závěr

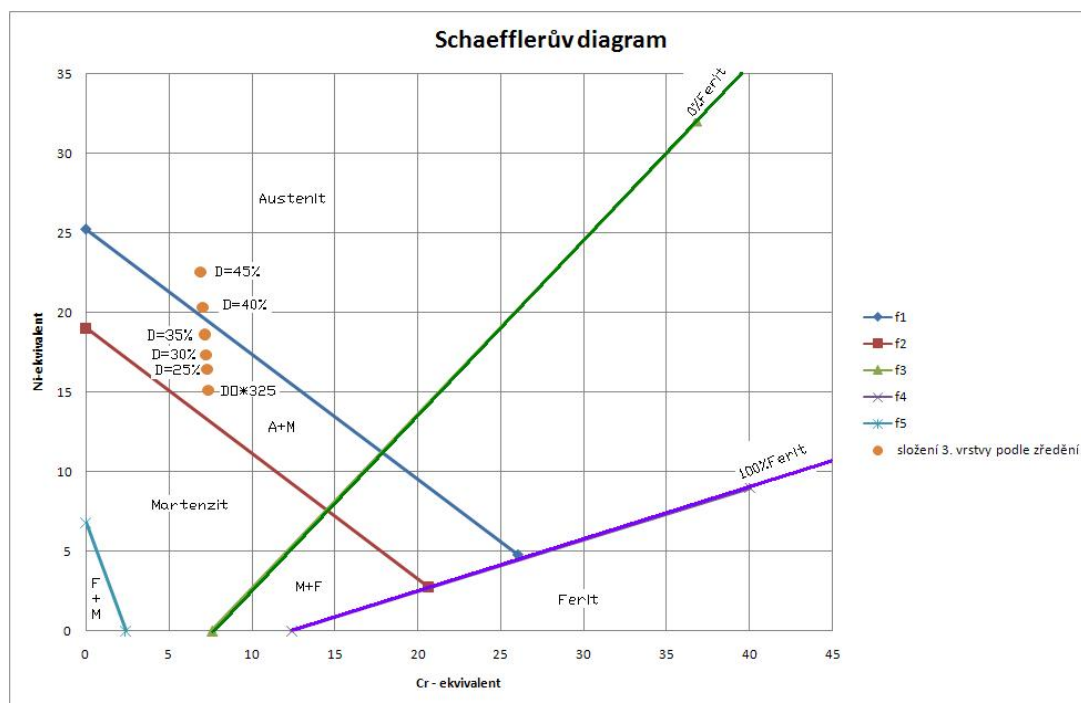
Ze zjištěných funkčních závislostí viz kapitoly „Grafy a komentář ke geometrii návaru“ a „Posouzení geometrie návaru“ vyplývá, že podmínky optimálního návaru - co nejširší svarová housenka, co největší převýšení, co nejmenší tepelně ovlivněnou oblast a závar, to znamená, co nejmenší zředění  $D_m$  základním materiálem, splňují návary v rozmezí svařovacího proudu mezi 170A a 250A. V tomto intervalu optimálního svařovacího proudu se bude zředění  $D_m$  pohybovat mezi 25 a 35%. Tvrdost návaru je poměrně nízká. Naměřené tvrdosti viz tabulka 1 tomu odpovídají. Podle teoretických předpokladů ze Schaefflerova diagramu vzniká v první návarové vrstvě austenitická struktura, kde sice mohou být obsažena malá množství martenzitu a steatitu, zvyšujících pevnost. Austenitická struktura vykazuje nízkou tvrdost, která je, jak je patrné, nižší než tvrdost udávanou pro svařovací drát. Z hlediska dosažené tvrdosti v první vrstvě návaru se předpoklady naplnily.

Predikci metalografických struktur, vznikajících v návaru ve třetí návaru, je možno určit graficky ze Schaefflerova diagramu viz. článek 2.8.3.1 a 2.8.4.

Tabulka 6

pro třetí vrstvu návaru		
D[%]	Ni- Ekv	Cr-Ekv
25	16,42	7,3
30	17,31	7,24
35	18,61	7,16
40	20,31	7,05
45	22,5	6,91
0	15,13	7,38

V tabulce č.6 jsou znázorněny hodnoty niklového a chromového ekvivalentu podle toho, jaké je zředění návaru ve 3.vrstvě. Poslední řádek udává hodnoty niklového a chromového ekvivalentu pro nulové zředění, to znamená 100% složení drátu DO\*325, který firma Castolin uvádí, že má tvrdost 37 HRC.



Obr. 41 Schaefflerův diagram pro různé hodnoty zředění ve třetí vrstvě návaru

Jaké bude konečné složení 3. vrstvy, zjistíme vynesemím bodů do Schaefflerova diagramu, odpovídajícím různému zředění D. Bod odpovídající nulovému zředění složení drátu se značí DO\*325 a nachází se v oblasti s austenitem a martenzitem. Tím, jak se zvyšuje zředění návaru litinou, procento austenitu v 3. vrstvě návaru se zvyšuje a klesá množství martenzitu. Je to znázorněno tím, že se zvyšujícím se zředěním, se body, které odpovídají složení vzniklé struktury, budou blížit k austenitu. To znamená, že se zvyšujícím se zředěním, bude klesat tvrdost ve 3. vrstvě návaru. Z hlediska zachování kvality návaru, bude hraniční hodnotou zředění 35%. Potom už návar bude příliš měkký a nebude dobře chránit proti otěru.

Předepsané tvrdosti 37HRC se nejvíce budeme blížit při 25%. Přihlédneme-li na interval optimálního svařovacího proudu, kdy bude maximální kvalita konečného návaru, plyne, že by se zředění mělo pohybovat od 25 do 35% a to bez ohledu zda navařujeme jednu nebo až tři vrstvy návaru. Při zředění 35% bude ještě tvrdost 3. vrstvy návaru vyhovující, protože se tam

bude ještě vyskytovat martenzit, který má vysokou tvrdost – viz článek 3.5.1. Je vidět, že rozsah optimálních hodnot zředění koresponduje se získanými výsledky z experimentální části.

V návaru se objevoval steadit po hranicích zrn austenitu, což svědčí o vyšším obsahu fosforu v litině. V praxi je žádoucí, aby litina, na kterou se navařuje, měla co nejnižší obsah nežádoucích prvků jako je fosfor nebo síra, protože například v tomto případě díky vyššímu obsahu fosforu se tvoří steadit, který způsobuje, že první vrstva návaru je křehčí. Proto je méně odolná vůči rázovému dynamickému namáhání. Tím se ztrácí žádoucí efekt návaru, že první vrstva je pružnější a pohlcuje energii a vyšší vrstvy se zvýšenou tvrdostí, ale křehčí, chrání proti otěru.

V tepelně ovlivněné oblasti návarů se vyskytují metalografické struktury jako martenzit, transformovaný ledeburit, ferit, malé procento zbytkového austenitu a vyskytují se různé rozpuštěné kuličky grafitu. Martenzit a ledeburit jsou velmi tvrdé metalografické struktury, proto tvrdost tepelně ovlivněné oblasti je daná hlavně tvrdostí martenzitu a ledeburitu. Avšak martenzit a ledeburit jsou málo odolné vůči rázovému namáhání. A právě první návarová vrstva, která je těsně nad tepelně ovlivněnou zónou, vynahrazuje nepříznivé vlastnosti tepelně ovlivněné oblasti tím, že je pružnější.

Dále se ukázalo, že i návar s minimálním zředěním, pokud byl navařen velkým rozkyvem hořáku při nízkém proudu I a tedy malém odtavovacím výkonu, může obsahovat trhliny. Jejich příčinou není tvrdost návaru, ale velké zbytkové pnutí, resp. malá tloušťka návaru s ohledem na jeho šířku a tím i velké měrné pnutí na průřez návaru.

Trhliny jsou mezikrystalické a šíří se po hranici zrn austenitu, kde se právě vyskytuje steadit, který je křehký, a při vzniku velkých vnitřních pnutích popraská.

Zvláště u návarů s malým převýšením a velkou šířkou svarové housenky viz obr. 39 a obr. 40 se trhliny šíří od tepelně ovlivněné oblasti směrem k povrchu. Spodní části svarové lázně přicházejí do styku s litinou, kde později vzniká tepelně ovlivněná oblast. Při tuhnutí vznikají velká pnutí, která způsobí částečné smrštění návaru. Pnutí, která jsou v tepelně ovlivněné zóně, se šíří k návaru právě po hranicích zrn austenitu, kde krystalizuje steadit. Proto lze často pozorovat trhliny šířící se od tepelně ovlivněné oblasti.

## 5. Seznam použité literatury:

- [1] Tměj J., Neumann H., Jenší S., Teorie svařování, Vysoká škola strojní a textilní v Liberci , Liberec, 1990.
- [2] Kuncipál J. a kolektiv, Teorie svařování, 1. Vyd., Praha, Státní nakladatelství technické literatury, 1986.
- [3] Pluhař J., Koritta J. a kolektiv, Strojírenské materiály, 3.vyd., Praha, Státní nakladatelství technické literatury, 1981.
- [4] Nová I., Materiály a strojírenská technologie, 1.vyd. , Vysoká škola strojní a textilní v Liberci, Liberec, 1990.
- [5] Nová I., Nováková I., Bradáč J., Technologie I. Slévání a svařování, 1. Vyd. , Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2006.
- [6] Hrivňák I., Janák G., Ákossy Á., Materiálové problémy pre energetiku, Zváranie , č.12, 1997.

## **Poděkování**

Na závěr bych chtěl poděkovat především Prof. ing. Ivě Nové, CSc. Za odborné vedení při realizaci této bakalářské práce. Dále Ing. Zdeňku Hudcovi, Ph.D. za poskytnuté rady v průběhu tvorby bakalářské práce. Dále pracovníkům firmy Castolin za vytvoření vhodných podmínek při realizaci experimentální části.

Také bych rád poděkoval svým rodičům za projevenou trpělivost a podporu při studiu na vysoké škole.

## **6. Seznam příloh**

Příloha 1 – nafotografované makrostruktury metalografických vzorků návarů

Příloha 2 – oba bloky litiny po navaření a očíslování návarů

## **7. Seznam použitých zkratk**

TOO – tepelně ovlivněná oblast

MAG – metal active gas

HAZ – heat affected zone

Obr. - obrázek

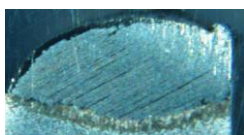
## Příloha 1





oba bloky litiny po navaření a očíslování návarů

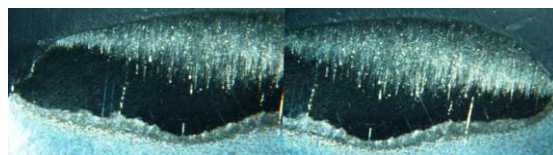
## Příloha 2



M1



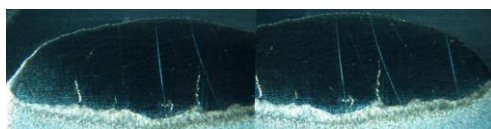
M2



M3 – levá a pravá část



M4



M5 – levá a pravá část



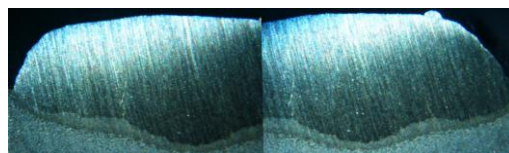
M6



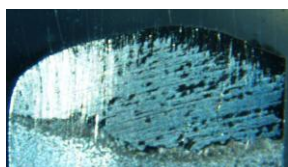
M61



M7



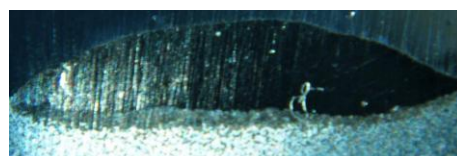
M8 – levá a pravá část



M9



M10



M11



M13



M14



M15



M16



M17



### **Prohlášení**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 o právu autorském zejména § 60 (školní dílo) a § 35 (o nevýdělečném užití díla k vnitřní potřebě školy).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do její skutečné výše).

Datum: 05.06.2009

.....  
*Podpis*

### **Statement**

I was aware that my bachelor thesis is fully covered by the law n.121/2000 about copyright in particular §60 (school work) and § 35 (a non profit use on the work of the internal needs of schools).

I note that the TUL has the right to conclude licensing agreements for use of my work and say that I agree with the possible use of my work (selling, renting, etc.).

I am aware that the use of their work or provide a license for its use can only with the consent of TUL, who has the right to require from me a reasonable contribution towards the costs incurred by the university to create works (until the actual amount).

Date : 05.06.2009

.....  
*Signature*